

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en
Tecnologies Industrials**

**Estudi aerodinàmic de l'aleró posterior d'un
Fórmula 1 estant activat i desactivat el DRS.**

MEMÒRIA

Autor: Joan Vilà Famada

Director: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Juny 2015



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'aerodinàmica en la Fórmula 1 pren molta importància a la fase de disseny degut a que pot arribar a determinar si un monoplaça és competitiu o no. És per això que és important estudiar totes les parts aerodinàmiques per poder determinar quines són les que afecten en major magnitud.

L'objectiu d'aquest treball és realitzar un estudi aerodinàmic d'un monoplaça de la Fórmula 1 fent èmfasi en la part posterior i el sistema DRS.

Utilitzant programari de simulació CFX s'estudiarà quantitativament l'efecte del sistema DRS incorporat l'any 2011 per reduir la resistència a l'avanç, amb la finalitat de determinar l'eficàcia d'aquest sistema dins el món de la Fórmula 1.

Índex

RESUM	1
ÍNDEX	3
1 GLOSSARI	7
2 PREFACI.....	11
2.1 Origen del projecte	11
2.2 Motivació	12
2.3 Requeriments previs	12
3 INTRODUCCIÓ	13
3.1 Objectius del projecte	13
3.2 Abast del projecte	14
3.3 Metodologia	14
4 AERODINÀMICA.....	15
4.1 Història de l'aerodinàmica en la Fórmula 1	15
4.2 Estudi de l'aerodinàmica	16
4.3 Nombres adimensionals.....	19
4.4 Equacions.....	21
4.4.1 Equació de continuïtat	21
4.4.2 Principi de Bernoulli	21
4.4.3 Efecte Venturi	22
4.5 Força aerodinàmica.....	23
4.5.1 Càrrega aerodinàmica i resistència a l'avanç	23
4.6 Capa límit i desprendiment de la capa límit	24
4.7 Eficiència aerodinàmica	25

5 COMPONENTS AERODINÀMICS EN LA FÓRMULA 1	27
5.1 Alerons.....	27
5.2 Difusor	28
5.3 Pontons.....	29
5.3.1 Aletes dels pontons.....	29
5.4 retrovisors.....	29
5.5 Deflectors	30
5.6 Casc.....	30
5.7 Suspensió i rodes	31
5.8 Carrosseria	32
5.9 Fons pla.....	33
6 ALERONS	35
6.1 Element bàsic: l'ala	35
6.2 Alerons de dos elements	39
6.3 Alerons amb varis elements	40
6.4 Aleró davanter	41
6.5 Aleró posterior.....	42
6.5.1 DRS	43
6.5.1.1 En què consisteix?	44
6.5.1.2 Funcionament del DRS.....	45
6.5.1.3 Reglament del DRS.....	46
6.5.1.4 Tipus de DRS	46
7. DISSENY, SIMULACIÓ I ANÀLISIS DEL DRS.	49
7.1 Software	49
7.1.1 Preprocessor	49
7.1.1.1 Disseny.....	49
7.1.1.2 Mallat de la geometria.....	50
7.1.1.3 Condicions de contorn	51
7.1.2 Solucionador	52
7.1.3 Postprocessador	53

7.2 Estudis	53
7.2.1 Pla principal més flap	53
7.2.1.1 Inclinació de -9°	54
7.2.1.2 Inclinació de -3°	56
7.2.1.3 Inclinació de 0°	57
7.2.1.4 Inclinació de 3°	58
7.2.1.5 Inclinació de 9°	59
7.2.1.6 Inclinació de 12°	61
7.2.1.7 Inclinació de 25°	62
7.2.1.8 Síntesis dels resultats.....	64
7.2.1.9 Conclusions dels resultats.....	66
7.2.2 DRS en els circuits	66
7.2.2.1 DRS en un circuit amb alta càrrega aerodinàmica	67
7.2.2.2 DRS en un circuit amb baixa càrrega aerodinàmica	74
7.2.2.3 Comparació dels perfils d'alerons.....	81
 8 PLANIFICACIÓ TEMPORAL.....	82
 9 COSTOS	83
 10 IMPACTE AMBIENTAL.....	86
 11 CONCLUSIONS	87
 12 BIBLIOGRAFIA	88
 13 APÈNDIX	91
8.1 Circuit d'Albert Park-Melbourne	91
8.2 Circuit de Sepang	92
8.3 Circuit de Shanghai	92
8.4 Circuit de Sakhir	93
8.5 Circuit de Catalunya	93
8.6 Circuit de Montecarlo	94
8. 7 Circuit de Gilles Villeneuve	94
8.8 Circuit de Red Bull Ring	95
8.9 Circuit de Silverstone	95
8.10 Circuit de Hungaroring	96

8.11 Circuit de Spa-Francorchamps	96
8.12 Circuit de Monza	97
8.13 Circuit de Marina Bay	97
8.14 Circuit de Suzuka	98
8.16 Circuit de Americas-Austin	99
8.17 Circuit Hermanos Rodríguez	99
8.18 Circuit de José Carlos Pace-Interlagos	100
8.19 Circuit de Yas Marina	100

1 Glossari

Aerodinàmica: Branca de la mecànica de fluids que estudia la interacció entre els cossos sòlids i mòbils a través dels quals es desplaça.

Alerons: Dispositius instal·lats en la part davantera i posterior del vehicle que produeixen càrrega aerodinàmica permetent velocitats més ràpides pel pas per corba.

Àrea frontal: És l'àrea del monoplaça vista des del davant i és la que es veu afectada per la força de resistència a l'avanç un cop el monoplaça es mou.

Capa límit: És la regió d'un fluid en moviment a les proximitats d'una superfície sòlida que es veu influenciada per la presència de dita superfície. A la capa existeixen importants gradients de velocitat i pot haver-ne també de temperatura, tot concentrant-se en ella la major part de la resistència de quantitat de moviment, energia o matèria.

Càrrega aerodinàmica: Efecte basat en el principi de Bernoulli que consisteix en la generació de sustentació mitjançant diferents pressions entre les zones superior i inferior d'un cos.

Centre de gravetat: Punt respecte el qual les forces que la gravetat exerceix sobre els diferents punts materials que constitueixen el cos produeixen un moment resultant nul. Quant més baix es trobi aquest punt, més estabilitat tindrà el monoplaça.

Coeficient de resistència a l'avanç C_D : Coeficient que indica la resistència que pateix un cos al moviment en la direcció d'aquest.

Coeficient de sustentació C_L : Coeficient que indica la capacitat de crear una força en direcció perpendicular a la de la velocitat de moviment. En el cas de la Fórmula 1 interessa que sigui perpendicular a l'asfalt cap a baix i s'anomenarà càrrega aerodinàmica considerant-la positiva quan va cap a baix.

Deflector: Panell de canalització aerodinàmica utilitzat pels enginyers per intentar que l'aire arribi el més net possible als pontons.

Difusor: Element utilitzat durant dècades ha anat agafant protagonisme en els últims anys degut al seu perfeccionament aerodinàmic. Es tracta d'un element situat a la part posterior del cotxe, sota l'aleró del darrere, que accelera el flux aerodinàmic al modificar el diferencial de pressió entre la part superior i la part inferior del monoplaça. Com més gran sigui i més aire rebi, major serà la càrrega aerodinàmica que generarà. A més a més, genera molt poca resistència a l'avanç.

Downforce: Força que empeny el cotxe cap a baix, permetent que el vehicle s'agafi millor a l'asfalt.

DRS (DragReduction System): És un pla mòbil activat a partir d'un dispositiu hidràulic o elèctric que redueix la fricció amb l'aire i proporciona una velocitat punta major.

Efecte sòl: És un fenomen aerodinàmic que apareix quan un cos, amb un diferència de pressions entre la zona de sobre i de sota, està molt a prop del terra provocant unes alteracions en el flux d'aire.

Eficiència aerodinàmica: Quocient entre la càrrega aerodinàmica i la resistència a l'avanç.

Estela: Rastre que deixa un vehicle al desplaçar-se.

Federació Internacional de l'Automòbil (FIA): Organisme que organitza l'automobilisme mundial i regeix la immensa majoria de les associacions automobilístiques nacionals.

Flux laminar: Moviment d'un fluid en el que les partícules es mouen de manera ordenada o suau. Les lamines del fluid es mouen en paral·lel sense barrejar-se les unes amb les altres.

Flux turbulent: Moviment d'un fluid en el que les partícules es mouen desordenadament i formant trajectòries similars a la dels remolins.

Força de resistència a l'avanç: Força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid amb direcció paral·lela a la de la velocitat del corrent incident.

Força de sustentació: Força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid de direcció perpendicular a la de la velocitat del corrent incident.

Grip: El grip és l'adherència del cotxe a la pista i com aquest afecta en les corbes ràpides. Una alta adherència significa altes velocitats en el pas per corba. Els principals factors del grip són l'aerodinàmica, la càrrega creada pel vehicle i les propietats dels pneumàtics.

HANS: És un collarí dissenyat per reduir considerablement el risc de lesions al cap i al coll dels pilots d'automobilisme.

KERS (KineticEnergyRecovery System): El sistema de recuperació energètica recupera l'energia no utilitzada en el procés de frenada transformant-la en energia elèctrica perquè posteriorment el motor proporcioni potència addicional.

Línia de corrent: Línia que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt.

Mecànica de fluids Computacional (CFD): És una de les branques de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes sobre el flux de substàncies.

Nombre de Mach: És una mesura de velocitat relativa que es defineix com el quocient entre la velocitat d'un objecte i la del so en el mitjà en el que es mou l'objecte.

Nombre de Reynolds: És un nombre adimensional utilitzat en mecànica de fluids, disseny de reactors i fenòmens de transport per caracteritzar el moviment d'un fluid.

Pontons: Estructura lateral que, a part d'oferir seguretat davant dels impactes, guarda en el seu interior els radiadors i altres components de la Fórmula 1 com les bateries i el KERS. També compleix funcions aerodinàmiques i la seva forma defineix en gran part la eficiència de la part del darrera del monoplaça.

Principi de Bernoulli: Descriu el comportament d'un fluid. D'aquí es dedueix que els punts amb màxima velocitat són els que tenen menor pressió i al revés.

Resistència a l'avanç (Drag): Força que pateix un cos al moure's a través de l'aire oposant-se a l'avanç del mateix.

Resistència aerodinàmica: Força que pateix un cos al moure's a través de l'aire i en particular a la component d'aquesta força en la direcció de la velocitat relativa del cos respecte el medi.

Safety car: És un vehicle de la organització que depèn directament de la Direcció de Carrera. La seva funció bàsica és la de neutralitzar les carreres per agrupar als participants en un accident greu o per causes meteorològiques.

Sidepods: Són ventiladors de refrigeració que es col·loquen sobre les tomes d'aire dels pontons laterals per evitar que el motor es sobreescalfi.

Sobreviratge: Fenomen que apareix quan les rodes del darrera d'un vehicle perden adherència fent que el cotxe es desplaci cap a l'exterior de la corba.

Subviratge: Fenomen que apareix quan les rodes davanteres perden adherència provocant que la part davantera no giri i el cotxe tendeixi a seguir recta en la corba.

Trajectòria: Camí real seguit per una partícula fluida.

Túnel de vent: És una eina d'investigació desenvolupada per ajudar en l'estudi d'efectes del moviment de l'aire al voltant d'objectes sòlids.

Winglets: Aleró de mida petita que els enginyers utilitzen per generar càrrega aerodinàmica o canalitzar el flux aerodinàmic.

Wishbone: Triangle de la suspensió.

2 Prefaci

Anteriorment, les mans del pilot eren primordials per poder aconseguir el campionat mundial degut a que tots els monoplaques eren molt semblants. Al veure que millorant l'aerodinàmica es podia ajudar als pilots a aconseguir millors resultats, els equips van començar a estudiar totes les parts del monoplaça influents.

Gràcies a la constant recerca de millores en la fórmula 1, fa que avui en dia sigui la competició d'automobilisme més popular i prestigiosa on els monoplaques utilitzats tenen incorporada la última tecnologia disponible. Un concepte important va ser introduït l'any 2011 en el món de la Fórmula 1, el sistema DRS.

Any rere any, la Federació Internacional del Automòbil (FIA) limita mitjançant un reglament tècnic les tecnologies utilitzades en els monoplaques, per tant, els equips estan contínuament cercant millores que ajudin a guanyar mil·lèsimes de segon. Per a estudiar i millorar el funcionament aerodinàmic del monoplaça les escuderies utilitzen programes de simulació de dinàmica de fluids.

2.1 Origen del projecte

Des dels inicis de la Fórmula 1 la FIA ha limitat els cotxes per a la seguretat del pilots. Amb aquestes limitacions els equips han hagut d'adaptar-se per a aconseguir que els monoplaques siguin més competitius i tinguin més prestacions.

Una de les novetats del 2014 va ser el canvi total de la mecànica utilitzant propulsors V6 Turbo amb la finalitat de ser incorporats als automòbils del carrer. No obstant, no és l'únic sistema que ha estat introduït en els últims anys. El sistema KERS i el DRS han ajudat a millorar els monoplaques i a crear una major espectacularitat en la Fórmula 1.

El turbo elèctric soluciona un dels majors problemes que tenen els turbos convencionals: el *lag* o el període que transcorre des de que es prem l'accelerador fins que l'augment de la pressió és efectiva. Per alimentar aquest petit motor elèctric, s'utilitza l'energia provinent de l'energia de frenada y del sistema que permet a la primera turbina del turbo aprofitar part dels gasos d'escapament.

El fre regeneratiu o KERS (Kinetic Energy Recovery System) és un dispositiu que permet transformar part de la energia cinètica d'un vehicle en energia elèctrica. Consisteix en recuperar l'energia que es genera en les frenades i utilitzar-la posteriorment en altres punts del circuit. La seva durada és de 6,6 segons generant entre 70 i 80 cv de potència. En la passada temporada, s'ha substituït per l'ERS (Energy Recovery System) que proporciona 120 cv durant 33,3s aprofitant els gasos d'escapament i, com en el KERS, l'energia de frenada.

El sistema DRS (DragReduction System) és un dispositiu introduït en la temporada 2011 amb l'objectiu de reduir la càrrega aerodinàmica del monoplaça i així augmentar la velocitat punta entre 10 i 15 km/h per facilitar els avançaments.

Amb la utilització d'aquest últim sistema a l'aleró del darrera s'aconsegueix augmentar considerablement la velocitat en les zones on es permet la seva activació, fent que el seu bon disseny sigui determinant per poder realitzar avançaments de la forma més senzilla. Com es tracta d'un sistema relativament nou, serà objecte d'estudi en aquest projecte.

2.2 Motivació

La majoria dels circuits del mundial de la Fórmula 1 contenen dos rectes on els monoplaces arriben a velocitats punta molt elevades. Gràcies al sistema DRS es poden aconseguir unes velocitats majors disminuint la càrrega aerodinàmica amb la finalitat de disminuir la distància amb el cotxe de davant.

És evident que en qualsevol competició on la rivalitat és present i les tecnologies són la base dels monoplaces és important mantenir en secret qualsevol millora, per tant, totes les escuderies faciliten poca informació sobre els seus sistemes elèctrics i electrònics. Amb aquest estudi es mostrarà quantitativament com afecta el sistema DRS en la aerodinàmica.

2.3 Requeriments previs

Per poder dur a terme correctament aquest projecte s'han de tenir unes nocions bàsiques de la Fórmula 1 i dels elements aerodinàmics que constitueixen els monoplaces.

A més a més, s'ha de saber treballar amb programari de simulació CFX on ens permetrà estudiar la diferència de l'aleró del darrera estant activat i desactivat el DRS.

3 Introducció

En els últims anys s'ha pogut observar com l'aerodinàmica té gran rellevància en la Fórmula 1, on la combinació d'un bon coeficient de resistència a l'avanç i de sustentació dels alerons i un bon disseny dels difusors fan que un pilot tingui possibilitats de ser campió.

Per a poder dur a terme l'estudi es poden utilitzar dos alternatives:

- Simulació CFD (Computational Fluid Dynamics) o CFX que permet realitzar anàlisis de sistemes relacionats amb el flux de fluids, transferència de calor i altres fenòmens relacionats per mitjà de simulacions per computador.
- Túnel de vent o túnel aerodinàmic que és una eina que ajuda en l'estudi dels efectes del moviment d'un fluid, en aquest cas de l'aire, al voltant d'objectes sòlids.

3.1 Objectius del projecte

El primer objectiu del projecte és comprendre la importància que té l'aerodinàmica en la Fórmula 1 i perquè els equips es gasten milions d'euros en millorar les prestacions dels monoplaça.

A continuació, és ser conscient de les diferents parts aerodinàmiques que té un monoplaça i la importància de cadascuna.

Per últim, l'objectiu principal del projecte és comparar quantitativament l'activació del DRS i obtenir la geometria d'aquest sistema més eficient

Per a poder dur-ho a terme es seguiran els següents passos:

- Primerament s'estudiarà el comportament de l'aire i les forces generades modificant l'angle d'atac de l'aleró posterior.
- Seguidament es farà una comparativa del sistema DRS estant activat i desactivat en circuits d'alta càrrega aerodinàmica.
- Finalment es farà una comparativa del sistema DRS estant activat i desactivat en circuits de baixa càrrega aerodinàmica

Per a fer l'estudi dels diferents DRS i analitzar-los numèricament s'utilitzarà el programa *Ansys*.

3.2 Abast del projecte

En primer lloc s'introduirà el concepte de l'aerodinàmica i de on prové. Després es donaran a conèixer tots els elements que formen part de l'aerodinàmica del monoplaça així com una breu introducció de cadascun d'ells. Es farà especial èmfasi en l'aleró del darrera amb el sistema DRS, que serà objecte d'estudi posteriorment. Per últim, s'estudiaran diferents sistemes DRS i s'arribarà a una conclusió on es determinarà quin és el més òptim.

3.3 Metodologia

Mitjançant el programa CFX *Ansys* s'estudiaran diferents alerons amb sistema DRS per obtenir les diferències aerodinàmiques entre els diferents alerons equipats en la Fórmula 1. A partir dels diferents alerons es podrà determinar quins beneficis i inconvenients proporciona el sistema DRS i es determinarà quina geometria és la més beneficiosa per a cada circuit.

4 Aerodinàmica

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia com es comporta un fluid al voltant d'un objecte sòlid. L'estudi aerodinàmic consisteix en determinar les forces que realitza el fluid sobre el cos. El fluids han de ser un gas i no un líquid atès que si es treballa amb l'últim cas s'estaria parlant d'hidrodinàmica.

Per poder determinar el comportament del fluids és necessari el càlcul de diverses propietats com poden ser la seva velocitat, pressió, densitat i la temperatura en funció de la posició i el temps en el que es troba.

Hi han diferents alternatives per a poder fer l'estudi aerodinàmic d'un cos. La primera opció molt pràctica és construir una maqueta a escala i fer assajos en el túnel de vent. L'altre alternativa és l'assaig per ordinador mitjançant simulacions.

És important tenir en compte que l'aerodinàmica no contempla moviments o deformacions del cos, per tant, el cos immers en el fluid sempre rep la mateixa corrent a la mateixa velocitat i no es deforma ni plàsticament ni elàsticament.

Els equips d'enginyers de la Fórmula 1 tenen dos funcions claus a la hora de dissenyar l'aerodinàmica del monoplaça:

- Generar *Downforce*, força descendent o càrrega aerodinàmica per a que ajudi al monoplaça a fer força contra el terra. Aquesta força empeny els pneumàtics cap a l'asfalt millorant l'adherència del cotxe i tenir un pas per les corbes millor.
- Generar poca resistència a l'avanç que provoca que el monoplaça vagi més ràpid.

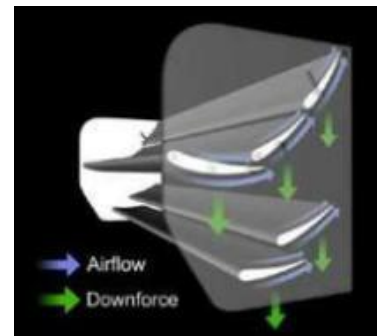


Figura 4.1: Forces aerodinàmiques. [1]

4.1 Història de l'aerodinàmica en la Fórmula 1

L'aerodinàmica en la Fórmula 1 s'ha convertit en una peça clau per poder aconseguir bons resultats, on les escuderies inverteixen milions d'euros en investigació cada any. Els enginyers responsables del disseny aerodinàmic del monoplaça tenen dos preocupacions principals: la primera, obtenir la màxima càrrega aerodinàmica per augmentar l'adherència sobre la pista i la segona, minimitzar la resistència aerodinàmica a l'avanç.

Des de finals de 1960 els equips van començar a estudiar i a experimentar els alerons que tots coneixem avui en dia. Els alerons de competició actuen de la mateixa manera que els avions però al revés. L'aire flueix a diferents velocitats sobre els dos costats de l'aleró creant una diferència de pressió, aquest procés es coneix com el Principi de Bernoulli. L'aleró intenta equilibrar-se i, per tant, intenta moure's en la direcció de baixa pressió augmentant la càrrega aerodinàmica.

Els equips buscaven la geometria més òptima per la competició i com més grans feien els alerons més càrrega els hi proporcionaven. Al no haver-hi limitacions es van produir una sèrie d'accidents molt espectaculars el que va comportar que en la temporada de 1970 es van introduir unes noves regulacions per limitar el tamany i la ubicació dels alerons.

A mitjans de la dècada dels 70 es va descobrir "l'efecte sòl". Els enginyers de l'escuderia Lotus van dissenyar la part inferior del monoplaça aconseguint que es produís "l'efecte Venturi". Consisteix en disminuir la pressió de sota la carrosseria provocant una diferència de pressions que fa que el cotxe tendeixi a augmentar la força contra el terra i, així, millorar la tracció i prendre les corbes a major velocitat.

Al llarg dels anys la FIA a modificat el reglament i ha limitat els monoplaços per millorar la seguretat del pilots. L'any 2005 va introduir algunes limitacions destacables com la d'elevat l'aleró davanter i avançar l'aleró del darrera per reduir les velocitats. Els enginyers ràpidament es van ficar a treballar i van trobar una sèrie de solucions com la incorporació dels winglets.

L'any 2011 es va introduir el sistema DRS situat a l'aleró posterior millorant el comportament del monoplaça i augmentant la velocitat punta. Amb aquest sistema, restringit en unes parts del circuit durant la carrera i només habilitat quan el pilot es troba a menys d'un segon del pilot del davant, s'afavoreixen els avançaments i l'espectacle.

4.2 Estudi de l'aerodinàmica

Com ja s'ha dit anteriorment, els equips busquen que els monoplaços aconseguixin la màxima càrrega aerodinàmica possible amb la menor resistència a l'avanç. Construir la carrosseria i fer estudis un cop muntada sobre els cotxes és un cos elevadíssim que les escuderies no es poden permetre. A part, el temps en el que es tarda per obtenir resultats és massa elevat.

Per evitar costos innecessaris i poder prendre conclusions el més ràpid possible s'utilitzen tant els túnels de vent com programari CFX.

El primer d'ells consisteix en un circuit tancat on l'aire és accelerat per una turbina i una zona de proves amb molts sensors per anar recollint els resultats. En aquesta zona de proves és on col·loquen les maquetes dels vehicles que s'utilitzaran a les competicions. També conté una sala de control on els enginyers visualitzen el procés i analitzen els resultats.

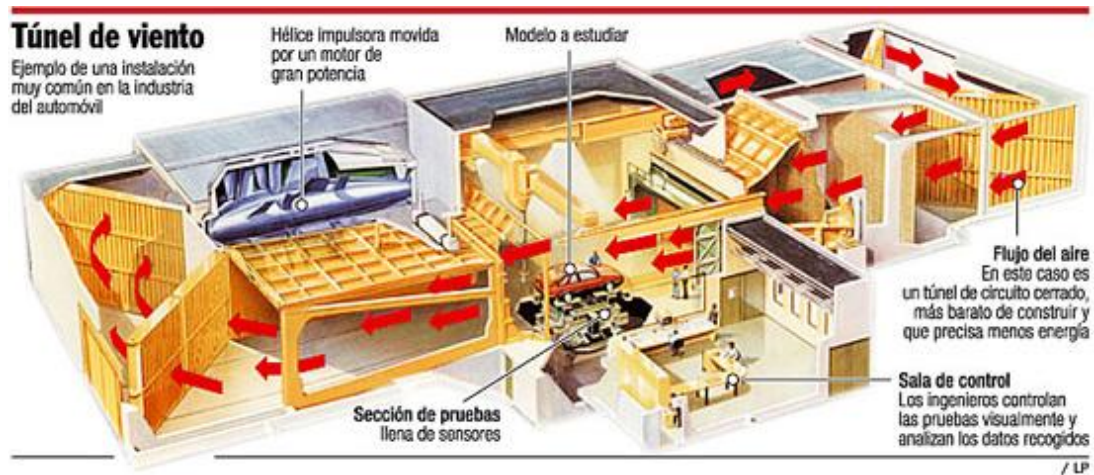


Figura 4.2: Representació d'un túnel de vent. [2]

Les maquetes en els túnels de vent no sempre estan parades i ni és només l'aire qui es mostra actiu. Normalment la superfície sobre la que es recolze el vehicle és mòbil per poder realitzar les proves aerodinàmiques amb les rodes en moviment.

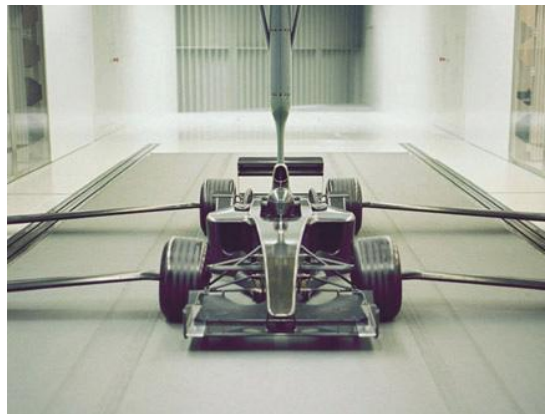


Figura 4.3: Sistema d'un túnel de vent. [2]

Bàsicament el túnel de vent serveix per estudiar el comportament aerodinàmic del cotxe: Coeficients aerodinàmics, forces aerodinàmiques, centre de pressions i moments aerodinàmics.

En cada punt de la superfície del vehicle es produeixen forces que tenen a veure amb el seu moviment en un fluid com és l'aire. Una és la força de pressió que exerceix el fluid (normal a la superfície) i l'altre és la força de fricció amb el fluid provocada pels efectes viscosos (tangencial a la superfície).



Figura 4.4: Forces aerodinàmiques d'un monoplaça de Fórmula 1. [2]

Un altre mètode per a estudiar l'aerodinàmica del monoplaça és mitjançant la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD, Computational Fluids Dynamics) o CFX. Aquesta branca de la ciència s'encarrega de preveure la física relacionada amb el fluids i altres fenòmens relacionats com la transferència de massa i de calor a partir de mètodes numèrics i algorítmics. Aquest mètode és el més efectiu atès que ens proporciona resultats molt ràpids amb uns costos molt baixos. És per això que per estudiar l'aerodinàmica d'aquest projecte s'utilitzarà aquesta alternativa degut a les seves elevades prestacions.

La base de tots els programes CFX es basa en les equacions de Navier-Stokes que descriuen els moviments del fluid. A vegades és impossible resoldre-les exactament, per tant, els programes CFX recorren a aproximacions numèriques de la solució.

El procés de tots els programes CFX és sempre el mateix: preprocés, resolució, post-procés i anàlisis de la solució.

La fase de preprocés consta de dos etapes:

- Primerament es crea la geometria que es vol estudiar. Si s'estudia en 3D és interessant crear la geometria amb un programa CAD i importar-la.
- Seguidament es malla la geometria, consisteix en dividir el domini en un conjunt de cel·les finites les quals seran les zones d'estudi. També es poden refinar les zones més importants per obtenir més precisió.

Un cop finalitzada l'etapa inicial es procedeix a resoldre el problema:

- És el moment de configurar el programa determinant la física que es vol treballar; utilitzant l'equació de l'energia, el model de turbulència, tipus de fluid, velocitat del fluid...
- Es poden introduir els valors de les condicions de contorn i en quines parts actuen.
- Per últim, el programa resol les equacions. Pot fer-ho mitjançant el mètode dels volums finits, mètode dels elements finits, mètode de diferència finita...

Seguidament procedim amb el post-procés:

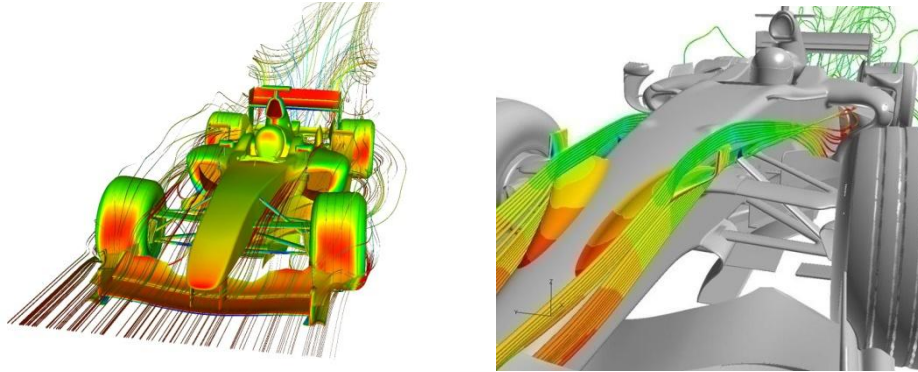
- Al tenir ja els resultats consisteix en analitzar-los tant analíticament com gràficament. El propi *solver* ens pot facilitar aquest procés.

Finalment valorar els resultats:

- L'enginyer ha de garantir que els resultats són els correctes i els esperats. En cas contrari, ha de millorar la geometria, el mallat, revisar les condicions de contorn o canviar els models físics que han estat provats.

Com s'ha vist, el mètode CFX és molt pràctic i aporta molts avantatges. Un d'ells és la possibilitat d'analitzar dissenys difícils de provar a nivell experimental.

Ens permet resoldre una gran varietat de problemes i treballar amb el nostre disseny sota diferents condicions de contorn i règims de treball, permetent l'aparició de possibles conflictes o errors i corregir-los el més ràpid possible.



Figures 4.5 i 4.6: Representacions de les línies de corrent amb *Ansys*. [3]

Si apareixen conflictes per la geometria utilitzada en el disseny és fàcil corregir-los, només cal tornar a dissenyar en la primera fase del procés i seguir amb l'estudi. És un gran avantatge en comparació amb els estudis fets en els túnels de vent que si es vol canviar s'ha de tornar a modificar la maqueta utilitzada.

Són evidents els avantatges d'estudiar l'aerodinàmica amb els sistemes computacionals en vers als del túnel de vent. La reducció de costos, de temps i de treball a la hora de provar cada nou prototip en cada nou problema que sorgeix al llarg de l'estudi fan que el segon mètode sigui un dels més utilitzats pels equips de la Fórmula 1 i el que s'utilitzarà en aquest projecte.

4.3 Nombres adimensionals

Amb la intenció de descriure les forces aerodinàmiques que actuen sobre els perfils de la forma més general possible és important expressar les forces en funció dels nombres adimensionals.

Tant el mètode del túnel de vent com el del sistema computacional és necessari simular amb un fluid el més semblant a l'aire real. És per això que s'utilitzen els nombres adimensionals, que incorporen varies propietats amb les corresponents dimensions. Amb cada nombre adimensional es poden controlar diferents característiques, d'aquí la seva gran utilitat.

Experimentalment es pot comprovar com el coeficient de sustentació màxim i les característiques de resistència depenen de la velocitat de l'aire i les dimensions de la secció aerodinàmica.

A partir de les equacions del moviment s'han de considerar varis paràmetres adimensionals. No obstant, com els efectes de compressibilitat i la viscositat de l'aire són tant importants per l'estudi aerodinàmic, el nombre de Reynolds i el nombre de Mach es prenen com els més destacats. D'aquesta forma, si dos perfils geomètrics tenen els mateixos nombres de Reynolds i Mach els seus coeficients de forces seran iguals.

El nombre de Reynolds relaciona la densitat, la viscositat i la dimensió típica d'un flux en una expressió adimensional molt influent en la dinàmica de fluids.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$
$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

ρ : densitat del fluid (Kg/m³)

v_s : velocitat característica del fluid (m/s)

D : diàmetre del tub per on circula el fluid o longitud característica del sistema (m)

μ : viscositat dinàmica del fluid (Kg/(m*s))

ν : viscositat cinemàtica del fluid (m²/s)

Està directament relacionat amb si un flux es considera laminar (nombre de Reynolds petit) o turbulent (nombre de Reynolds gran).

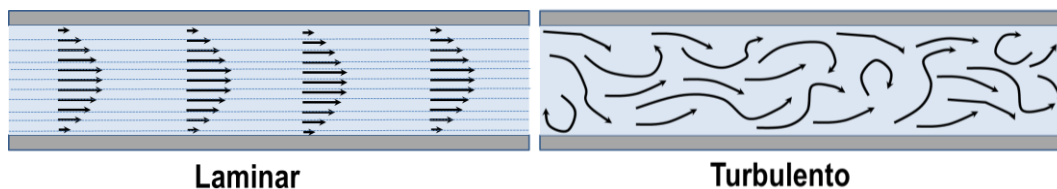


Figura 4.7 Flux laminar i flux turbulent. [4]

D'altra banda, el nombre de Mach és una mesura de la velocitat relativa definida com el quocient entre la velocitat d'un fluid i la velocitat del so en el mitjà en el que es mou l'objecte. La seva utilitat resideix en que es pren com a referència la velocitat de so la qual canvia depenent de les condicions de l'atmosfera.

El nombre de Mach s'utilitza amb objectes movent-se a grans velocitats o en estudis de fluids movent-se ràpidament dins de difusors o túnels de vent.

Si $Ma < 0,3$ es considera el fluid incompressible simplificant molt els càlculs sobretot a la hora d'utilitzar programari CFX.

$$Ma = \frac{V}{V_s}$$

V : velocitat de l'objecte (m/s)

V_s : Velocitat del so en el medi físic en el que es transmet (m/s)

4.4 Equacions

Per explicar la raó de perquè es crea la força aerodinàmica s'han d'explicar 3 principis físics: l'equació de continuïtat, el principi de Bernoulli i l'efecte Venturi que deriva dels dos primers.

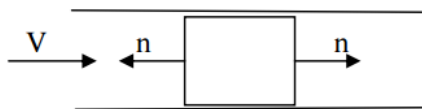
4.4.1 Equació de continuïtat

La massa en un sistema ni es crea ni es destrueix:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

Aquesta equació descriu el comportament d'un flux dins un conducte. Si el conducte no té entrades addicionals o més d'una sortida, la massa que entra és la que surt. Per a fluids incompressibles (nombres de Mach menors a 0,3), si l'àrea del conducte augmenta la velocitat del fluid disminueix i al revés.

Per a un flux estacionari:



$$\frac{\Delta m_{\text{entrada}}}{t} = \frac{\Delta m_{\text{sortida}}}{t}$$

m: massa (Kg/h)

t: temps (s)

ρ : densitat (Kg/m³)

A: àrea (m²)

v: velocitat (m/s)

$$\rho_{\text{entrada}} A_{\text{entrada}} v_{\text{entrada}} = \rho_{\text{sortida}} A_{\text{sortida}} v_{\text{sortida}}$$

4.4.2 Principi de Bernoulli

L'equació de Bernoulli és un cas particular del principi de la conservació de l'energia per fluids incompressibles entre dos punts que pertanyen a una línia de corrent. L'equació determina que la pressió estàtica més la pressió dinàmica més l'alçada del fluid en el punt 1 és igual a la pressió estàtica més la pressió dinàmica més l'alçada del fluid en el punt 2 més unes pèrdues degudes a la fricció, a elements singulars i al treball mecànic de vàlvules i bombes:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f1-2} + h_m$$

Tenint present que no hi ha pèrdues, no hi ha cap dispositiu que aporti treball mecànic i que les propietats de l'aire no varien amb l'altura, l'equació queda:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant}$$

Per tant, si la velocitat puja la pressió baixa i al revés.

En aquest fet es basa el funcionament dels elements aerodinàmics. Quan es fa fluir un fluid a través d'un cos, com pot ser l'aire i l'aleró, i l'objecte no és simètric, el fluid l'envoltarà de diferent forma per la part superior que per la part inferior provocant una diferència de velocitats entre les diferents zones i, per tant, una pressió diferent.

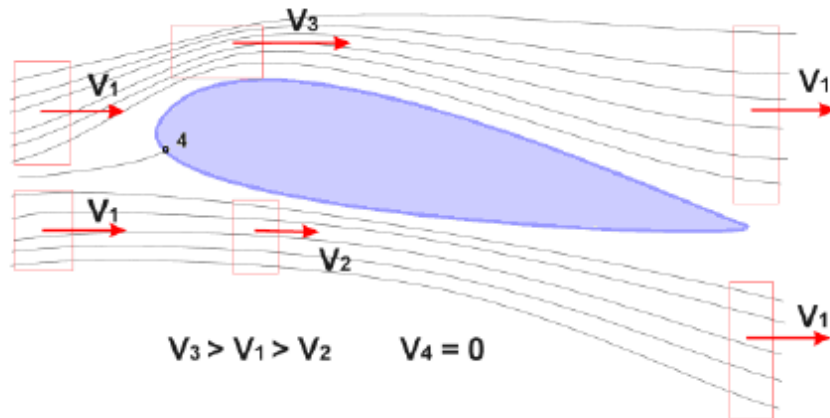


Figura 4.8: Línies de corrent al llarg d'un perfil. [5]

4.4.3 Efecte Venturi

El físic Giovanni Venturi en el segle XVIII va realitzar un experiment amb un tub que porta el seu nom. Aquest efecte s'explica a partir dels dos principis anteriors. Al passar un fluid per una àrea menor la seva velocitat augmenta.

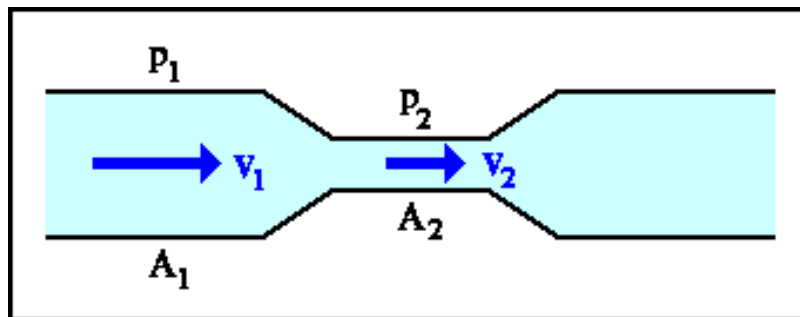


Figura 4.9: Tub de Venturi. [6]

Amb aquests 3 principis ja es pot explicar la força aerodinàmica.

4.5 Força aerodinàmica

Les dos components de la força aerodinàmica són resistència i sustentació. Aquestes dos forces es combinen per donar la força aerodinàmica total resultant, i aquest és el principi bàsic de totes les pressions que actuen sobre un cos com pot ser l'aleró.

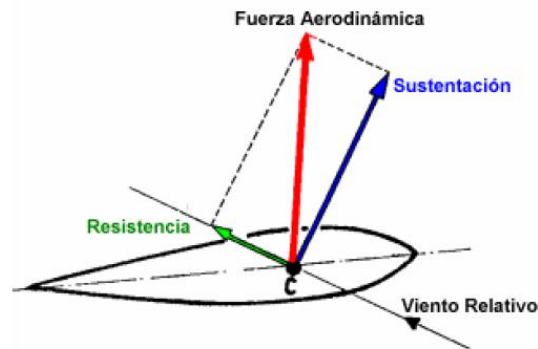


Figura 4.10: Descomposició de la força aerodinàmica. [7]

En la Figura 4.10 podem veure un perfil d'avió amb la força aerodinàmica citada anteriorment. La diferència amb l'aleró d'un monoplaça és que la força de sustentació és negativa i s'anomena càrrega aerodinàmica:

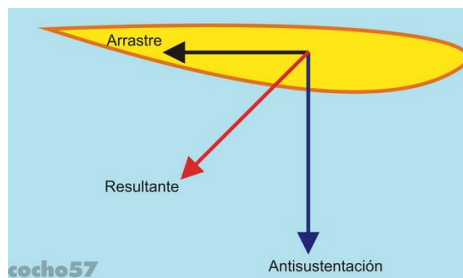


Figura 4.11: Força aerodinàmica d'un aleró. [8]

El fet de que un flux d'aire recorri un perfil aerodinàmic amb diferents velocitats és que genera una diferència de pressions i, per tant, una força amb direcció a la pressió més baixa, més coneguda com força aerodinàmica.

4.5.1 Càrrega aerodinàmica i resistència a l'avanç

La càrrega aerodinàmica és la força que empeny l'aleró cap al terra quan intervé el moviment d'un fluid, de direcció perpendicular a la velocitat del corrent incident. La resistència a l'avanç és causada per la fricció del perfil amb l'aire i el impediment que origina.

Les equacions de les forces de resistència i sustentació són:

$$Resistència = \frac{1}{2} \rho A v^2 * C_D$$

$$Sustentació = \frac{1}{2} \rho A v^2 * C_L$$

ρ : Densitat del fluid (Kg/m)

A : Àrea frontal (m²)

v : velocitat del fluid (m/s)

C_D : Coeficient de resistència

C_L : Coeficient de sustentació²³

La força de resistència a l'avanç és causada per les partícules d'aire al entrar en contacte amb l'aleró en moviment enganxant-se a ell degut a la viscositat. Al enganxar-se al perfil, les partícules properes es frenen formant-se el fenomen de capa límit. Aquesta força també depèn de la geometria del cos en moviment, a més secció transversal major superfície de contacte amb l'aire fent que s'adhereixi i es freni. Ho veiem amb la següent imatge:

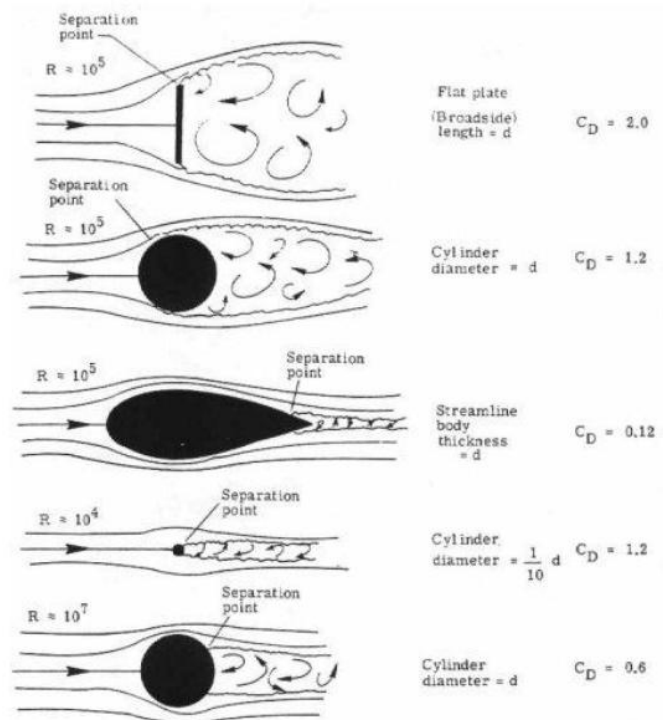


Figura 4.12: Coeficients de resistència segons la geometria. [9]

4.6 Capa límit i despreniment de la capa límit

En mecànica de fluids, la capa límit d'un fluid és la zona on el moviment d'aquest és pertorbat per la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. S'entén com aquella on la velocitat del fluid respecte al sòlid en moviment és de zero fins al 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada.

La capa límit pot ser laminar o turbulenta, encara que també poden coexistir zones amb flux laminar i flux turbulent. A vegades, és interessant que la capa límit sigui turbulenta, com pot ser en el cas de l'aeronàutica o en el món de la Fórmula 1. Es sol optar per perfils en forma d'ala que generen capa límit turbulenta atès que aquesta queda adherida al perfil a majors angles d'atac que la capa límit laminar, evitant així que el perfil entri en pèrdua.

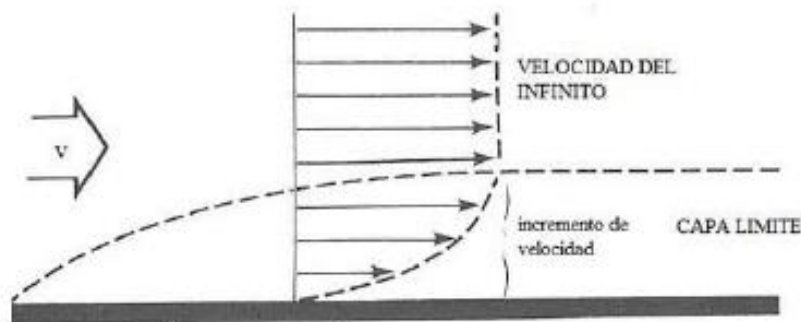


Figura 4.13: Capa límit. [10]

Com s'ha dit anteriorment, al entrar en contacte amb l'aleró l'aire perd velocitat al llarg de la capa límit fins arribar a velocitat nul·la a causa de la viscositat. En aquest punt, el fluid no pot vèncer la pressió adversa i a vegades retrocedeix. Aquest fenomen es coneix com despreniment de la capa límit fent que el fluid deixi d'estar en contacte amb el sòlid.

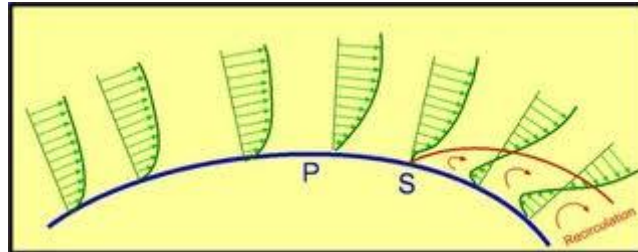


Figura 4.14: Despreniment de la capa límit. [11]

Com es pot veure en la imatge, el fluid arriba i entre en contacte amb el sòlid. Conforme avança la velocitat va disminuint a causa de la viscositat fins que al final es desprèn la capa límit.

Una capa límit turbulenta evita en major grau el desprendiment de la capa límit que una capa laminar. Com als equips de la Fórmula 1 no els interessa que es desprengui la capa límit han de tenir ben present aquest fenomen a la hora de dissenyar els elements aerodinàmics.

4.7 Eficiència aerodinàmica

L'objectiu principal dels equips de la Fórmula 1 és que els elements dels monoplaques presentin la màxima càrrega aerodinàmica amb la mínima resistència. Degut a la seva importància s'introdueix el concepte d'eficiència aerodinàmica que consisteix en la relació d'aquests dos conceptes: la càrrega aerodinàmica i la resistència a l'avanç. Es defineix amb el coeficient adimensional f .

$$f = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D}$$

F_L : Força de sustentació (N)

F_D : Força de resistència a l'avanç (N)

C_L : Coeficient de sustentació

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç

5 Components aerodinàmics en la Fórmula 1

Les mesures d'un cotxe de Fórmula 1 estan estrictament controlades pels reglaments tècnics de la FIA. Incloent les rodes, l'amplada màxima permesa és de 180cm i la longitud i l'alçada venen donades per altres paràmetres més específics. No obstant, la mitjana dels cotxes de Fórmula 1 són 463,5cm de llarg, 180cm d'ample i 95cm d'alt.

Analitzant les parts que formen els monoplaques de la Fórmula 1 es comprendrà perquè són els vehicles més ràpids dels circuits de competició. El motiu de les seves prestacions és la gran aerodinàmica que mostra cada part del vehicle.

5.1 Alerons

Moltes vegades es diu que els monoplaques de la Fórmula 1 s'assemblen als avions i no és pas per les grans velocitats a les quals arriben, sinó per la manera que té l'aire de fluir a través dels alerons. Els alerons actuen com avions però al revés.

Si estudiem el perquè un avió s'enlaira trobarem que és degut al disseny de les seves ales. Tenen una menor superfície a la part inferior fent que l'aire que circula per la part superior augmenti la seva velocitat respecte a l'aire de la part inferior. Aquest fet provoca una reducció de la pressió en la part superior i, per tant, existeixi una major pressió en la part inferior de l'ala que acaba empenyent cap a dalt l'avió. Aquest fet es coneix com la força de Bernoulli.

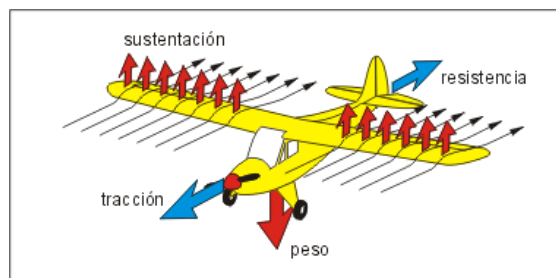


Figura 5.1: Representació de la força de sustentació d'un avió. [12]

En l'àmbit de la Fórmula 1 s'inverteixen els conceptes. Es busca una major pressió a la part superior dels alerons per empenyer el monoplaça cap a baix. Per tant, la part inferior dels alerons tindrà una major superfície per així reduir la pressió. L'objectiu és obtenir la màxima pressió cap a l'asfalt per tenir més càrrega aerodinàmica. Com es pot veure en la següent imatge els alerons dels monoplaques actuen al revés que les ales dels avions:



Figura 5.2: Força de sustentació deguda a la diferència de pressions en els alerons dels monoplaques de la Fórmula 1. [13]

Sens dubte, els alerons són un factor importantíssim en la càrrega del monoplaça. Generen al voltant del 66% de la força cap a l'asfalt procedent del cotxe. Al ser un element tant important aerodinàmicament, està constituït amb varis elements per millorar al màxim la seva eficiència.

A cada extrem estan equipats amb superfícies transversals (winglets) per reduir la resistència induïda, també coneguda com a resistència del final de l'ala o d'ala finita. Aquesta resistència és inevitable, tot i això els equips estudien com reduir-la i així no influeixi negativament en l'aerodinàmica del monoplaça. Aquesta resistència apareix pel fet que vivim en un món de tres dimensions on l'aire li és més fàcil anar-se'n pel lateral de l'aleró que per on ha d'anar, generant un remolí que provoca resistència.



Figura 5.3: Aleró davanter McLaren MP4-24. [14] Figura 5.4: Aleró posterior Redbull. [15]

5.2 Difusor

Es situa entre els pneumàtics del darrera creant baixa pressió sota el cotxe controlant el flux de l'aire per augmentar l'efecte sòl. Proporciona un 25% de la càrrega aerodinàmica total del monoplaça. És un component aerodinàmic molt important atès que sense impedir l'avanç del monoplaça ajuda en gran mesura a tenir molta tracció i a tenir bon pas per corba. Al ser tant important dins la competició la FIA l'ha limitat fins als 12,5 cm actuals.

Els equips han buscat en els últims anys maneres de millorar el seu rendiment, com el doble difusor creat l'any 2009 i prohibit pel 2011 o mitjançant l'aprofitament de l'emissió dels gasos produïts per la combustió. Aquest últim incorporat al 2010, tenia la finalitat de reduir la pressió augmentant la velocitat del vehicle però el van prohibir l'any 2012.

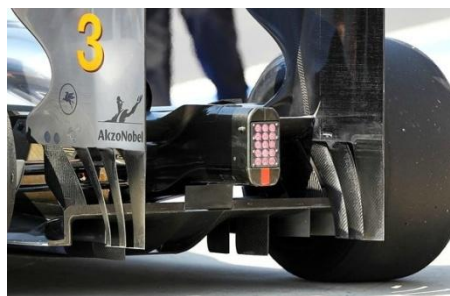


Figura 5.5: Difusor del McLaren MP4-26. [16]

5.3 Pontons

Aquest element és un inconvenient pels equips i si poguessin l'eliminarien. No obstant, és un component essencial per a la refrigeració del motor. A l'interior contenen els radiadors d'aigua i l'oli del motor, gran part de la electrònica i el radiador de la caixa de canvis.

Al generar un efecte negatiu les escuderies intenten fer-los al màxim petits tot i mantenir-se amb les seves obligacions de refrigeració, creant geometries que ajudin a l'aerodinàmica i millorin el flux d'aire sobre la part superior del difusor.



Figura 5.6: Pontó del Sauber. [17]

5.3.1 Aletes dels pontons

Al no millorar aerodinàmicament el monoplaça s'incorporen aletes als pontons per a millorar la resta de prestacions:

- Canalitzar millor l'aire a l'entrada dels radiadors.
- Separar el flux d'aire incident a les rodes del darrere.
- Dirigir el flux d'aire per a que incideixi millor a l'aleró posterior.
- Evacuar l'aire calent provinent dels radiadors.
- Evitar que el flux d'aire incideixi en els gasos d'escapament.

5.4 retrovisors

Per reglament han d'haver dos retrovisors en cada cotxe i han de tenir unes dimensions mínimes de 150x50mm amb un radi màxim a les cantonades de 10mm.

La seva posició queda a les mans de les escuderies sempre que es segueixin les limitacions imposades pel reglament.



Figura 5.7: Retrovisor del MP4-24. [18]

La geometria limitada pel reglament de la FIA i la posició elevada respecte els altres components fa que sigui un inconvenient aerodinàmic.

5.5 Deflectors

Els deflectors al contrari que els altres components aerodinàmics no tenen la funcionalitat de generar “downforce”, és a dir, no s'encarreguen de empènyer el cotxe cap a baix.

Tenen dos objectius destacats: el primer és canalitzar l'aire turbulent procedent dels pneumàtics cap als pontons per millorar la refrigeració del motor. Si ens fixem detalladament, els deflectors segueixen la forma del xassís i estan subjectats a la cantonada inferior exterior dels pontons. El segon és la d'orientar el flux d'aire per sota el cotxe cap al difusor millorant així l'aerodinàmica i desviant un petit volum de flux turbulent anomenat estela.



Figura 5.8: Deflector del Ferrari F138. [19]

5.6 Casc

Un dels dispositius més importants relacionats amb la seguretat és el casc dels pilots. A primera vista pot semblar que siguin els mateixos que es portaven als anys 70 però no tenen res a veure. Tant el disseny com la tecnologia de construcció han evolucionat de manera radical. Any rere any s'intenten incorporar millores, com la del HANS, per a millorar la seguretat dels pilots.

Els enginyers es preocupen cada cop més per la aerodinàmica del casc. Tenint en compte que el cap del pilot està ubicat just sota l'entrada d'aire que ventila el motor, els enginyers intenten desviar l'aire del casc cap a aquesta entrada.



Figura 5.9: Casc amb el sistema Hans de Ralf Schumacher a l'any 2004. [20]

5.7 Suspensió i rodes

Exteriorment la suspensió d'un F1 és senzilla. Cada roda està unida al xassís mitjançant dos braços en forma de 'V' coneguts com triangles de la suspensió. La complexitat resideix en escollir correctament els angles dels triangles per al bon funcionament de la suspensió i, així, aconseguir un bon pas per corba a baixes velocitats i un millor angle respecte la pista per a una millor aerodinàmica a altes velocitats.



Figura 5.10: Suspensió del McLaren MP4-24. [21]

Els pneumàtics generen una corrent d'aire turbulent que és útil per alimentar l'entrada d'aire que s'utilitza per a refrigerar el motor. La forma de les rodes redueix la turbulència en els deflectors laterals fent que el corrent d'aire que circula a través del monoplaça sigui més uniforme. No obstant, els pneumàtics generen al voltant del 40% de la resistència aerodinàmica total del monoplaça, és per això que és tant important dissenyar correctament l'aleró del davant per desviar l'aire.

Les rodes són elements crítics encarregats de transmetre la potència del motor, i les forces de frenat i de gir del cotxe a l'asfalt. És important tenir el màxim grip possible per transmetre el màxim parell i poder passar les corbes ràpides a velocitats elevades sense presentar sobreviratge o subviratge.

Per poder utilitzar tota la potència del monoplaça i transmetre-la a l'asfalt s'han d'utilitzar els pneumàtics oportuns per a cada climatologia. Els pneumàtics vigents subministrats per Pirelli en els monoplaques de la Fórmula 1 són:



Figura 5.11: Pneumàtics dels monoplaques de Fórmula 1. [22]

Els pneumàtics de sec tenen un diàmetre de 66cm i els de mullat 67cm per evitar el *aquaplaning*.

5.8 Carrosseria

La carrosseria d'un Fórmula 1 està dissenyat per produir el màxim *downforce* minimitzant a la vegada la resistència a l'avanç. Per aconseguir-ho, la part superior del cotxe està dissenyat per tallar l'aire tant finament com es pugui, en canvi, a la part inferior s'intenta crear una zona de baixa pressió entre el cotxe i l'asfalt que empenyi el monoplaça cap al terra.

L'efecte sòl es va començar a desenvolupar a partir dels anys 70 al utilitzar els alerons en els monoplaça generant *downforce* a les rodes. Per raons de seguretat van prohibir aquests alerons de grans dimensions i els enginyers van cercar alternatives per produir aquesta força. Aquest fet va fer tornar a dissenyar el xassís i es van introduir els sidepods del cotxe que contenen els radiadors que conduïen l'aire sota el cotxe cap als túnels. Aquests túnels es feien estrets en el centre i es feien més ample cap a la part posterior del cotxe. Tal i com es movia l'aire, es creava una àrea de baixa pressió entre el cotxe i el terra fent que el monoplaça tendís cap a l'asfalt. Quan els enginyers van començar a estudiar els primers resultats van veure certes millores. Reduint els flux lateral de sota el cotxe millorava encara més l'efecte sòl. D'aquesta manera es van adherir aletes ajustables en els sidepots dels cotxes per reduir l'aire lateral, novament el resultat va ser positiu a nivell aerodinàmic però l'organisme regulador de la competició va prendre mesures.

Actualment el reglament de la FIA estipula que els F1 han de tenir un fons pla i prohibeixen aquestes aletes. D'aquesta manera es redueix la forma de perfil invertit i es perd *downforce*, que redueix la velocitat en les corbes però incrementa la seguretat.

Tot i les limitacions que imposa la FIA, la geometria segueix tenint molta importància en la configuració aerodinàmica del monoplaça.



Figura 5.12: Carrosseria del McLaren MP4-24. [23]

5.9 Fons pla

El fons pla és la part més baixa del monoplaça. És la superfície on es recolzen els altres components i, per tant, la més propera al terra.

L'objectiu és fer que circuli la menor quantitat de flux d'aire possible per sota el cotxe per augmentar el *downforce*. Per aconseguir-ho existeixen diferents mètodes:

- Posicionar els vèrtex de l'aleró davanter en un determinat sentit per extreure l'aire de sota el cotxe.
- Apèndix col·locats sota la obertura dels pontons per desviar i allunyar el flux de l'aire de sota el cotxe.
- Llavis en els extrems de la superfície del fons pla, just a sota dels pontons amb la finalitat de treure l'aire de sota el cotxe.

Per evitar el desgast del fons es col·loca una taula de fusta limitada pel reglament. Segons la normativa ha d'haver-hi una distància mínima de 100mm entre els fons pla i l'asfalt.



Figura 5.13: Fons pla del monoplaça de Redbull. [24]

6 Alerons

Els alerons són elements indispensables en els F1 per poder arribar a velocitats tant elevades sense necessitat de motors més potents. Com s'ha esmentat anteriorment els alerons consten dos de les tres parts més importants de l'aerodinàmica d'un monoplaça.

A causa de la seva importància s'analitzaran els dos alerons presents en el monoplaça, el davant i el posterior, i finalment el sistema DRS que és l'objecte d'estudi del projecte.

6.1 Element bàsic: l'ala

L'aleró, també podent-ne anomenar ala, és un cos amb la forma geomètrica per crear forces de sustentació, o en el nostre cas, càrrega aerodinàmica presentant una mínima resistència. Un aleró és la secció transversal que defineix la forma d'una ala tridimensional i, a causa que les formes dels alerons són complexes, és lògic estudiar-lo de manera que tingui varies seccions dins d'ell.

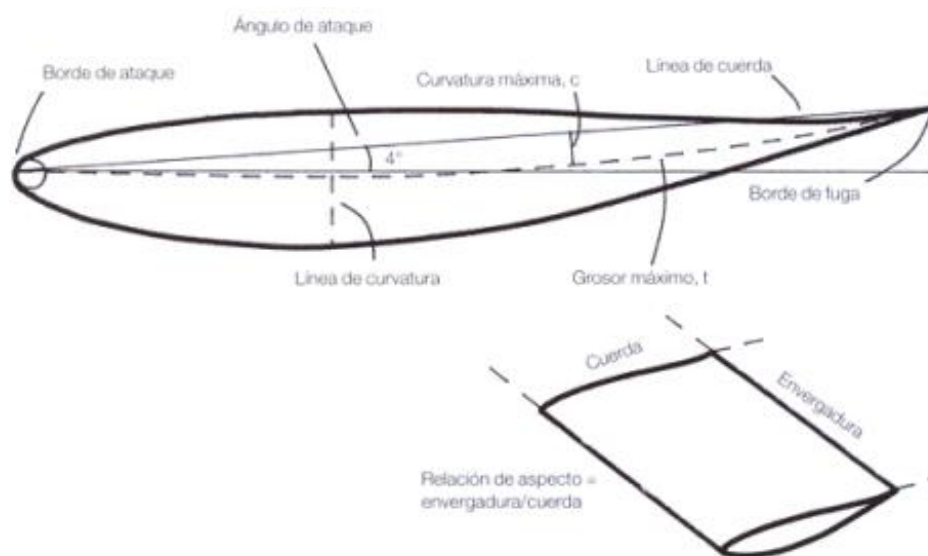


Figura 6.1: Diferents parts d'un aleró. [25]

El caire d'atac, situat a la part més del davant, s'intenta aproximar a la geometria d'una gota d'aigua atès que és la forma geomètrica més aerodinàmica. A la part posterior es troba el caire de caiguda que és on el flux d'aire pertorbat de l'ala retorna al corrent lliure. La línia recta que els uneix és la línia de corda especificada amb la lletra c. El gruix màxim d'un aleró es representa amb la lletra t, i s'expressa com un percentatge de la dimensió de la corda. L'angle d'atac o d'incidència d'un aleró és l'angle entre el flux d'aire i la línia de corda de l'aleró. A vegades es pot pensar que el flux d'aire que passa pel cotxe és horitzontal, paral·lel al terra. No obstant, no és així. Pot ser cert amb els alerons del davant però mai amb els alerons posteriors.

La secció d'una ala pot ser simètrica o asimètrica. Si es tracta del segon cas es diu que té curvatura i això significa que una superfície presenta més curvatura que l'altre. Els monoplaques de la Fórmula 1 utilitzen alerons amb curvatura per crear càrrega aerodinàmica.

Avui en dia, els alerons dels cotxes de carreres ja no poden tenir angles d'incidència variables només podent-los variar als boxes.

Un altre aspecte a destacar és el centre de pressions d'un aleró. Aquest punt és on actuen totes les forces de l'aleró anul·lant el moment incident. Com s'ha vist anteriorment, l'objectiu de l'aleró és reduir la pressió de la part inferior i augmentar la de la part superior. El resultat d'això és que es produeix tant càrrega aerodinàmica com, malauradament, resistència.

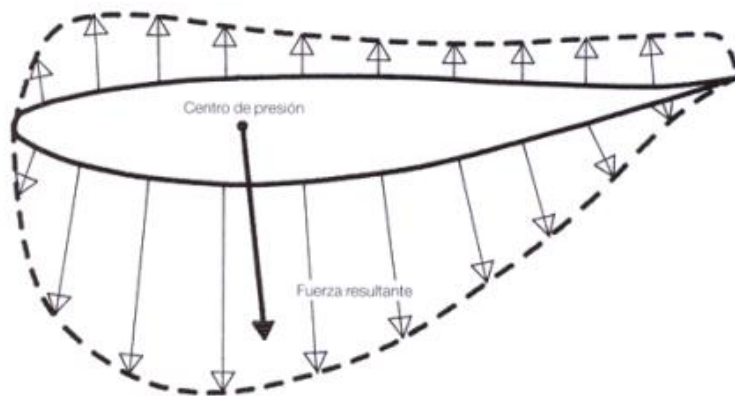


Figura 6.2: Distribució de pressions d'una ala. [25]

La càrrega aerodinàmica i la resistència a l'avanç augmenten conforme s'incrementa l'angle d'atac. Tot i això, existeix un cert angle present en tots els alerons en el qual l'aire en comptes de fluir suaument es torna inestable i es separa de la superfície de l'aleró, és a dir, es desprèn la capa límit provocant la seva disminució. Aleshores, quan succeeix aquest fet, en el que es perd càrrega aerodinàmica i es guanya resistència, es diu que l'aleró està en pèrdua.

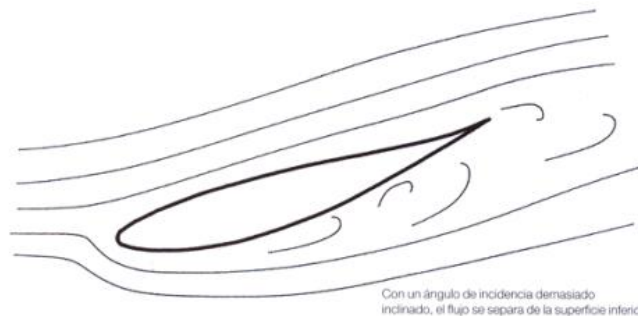


Figura 6.3: Aleró en pèrdua. [25]

Un altre terme important és la relació d'aspecte atès que és la relació entre l'amplada de l'aleró i la corda. Si l'aleró té una relació d'aspecte alta millora la seva eficiència.

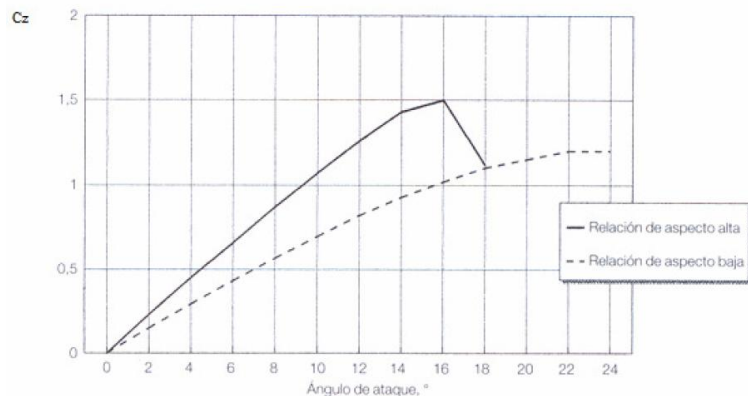


Figura 6.4: Influència en el coeficient de sustentació a la relació d'aspecte. [25]

És important augmentar la càrrega aerodinàmica al màxim. Un factor que ho beneficia és incrementar l'angle d'incidència de l'aleró fins al límit que es determina al entrar en pèrdua. La càrrega anirà augmentant de forma lineal fins que l'angle arriba als 14-16° variant segons la secció de l'ala i les condicions del flux.

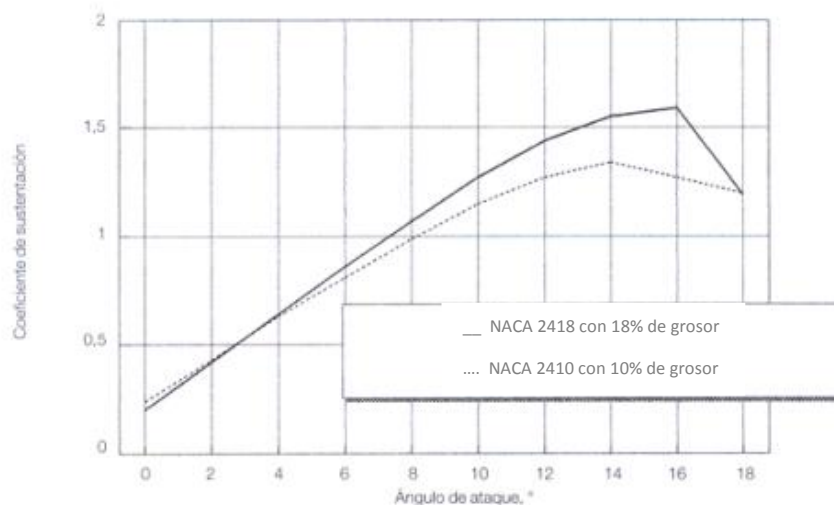


Figura 6.5: Coeficient de sustentació (C_L) en vers angle d'atac. [25]

Com es pot veure en el gràfic, al tenir menys gruix la pèrdua és més suau. Al contrari passa si l'aleró és menys prim, presentant una pèrdua més abrupta. A més a més, amb el NACA 2418 s'assoleix un coeficient de sustentació superior al 1,5 als 16°. En canvi, amb el NACA 2410 s'arriba al 1,3 de coeficient de sustentació als 14°.

L'efecte de canviar la curvatura és bastant diferent que el de canviar el gruix de l'aleró. Afegir curvatura a un perfil d'ala permet generar més càrrega aerodinàmica a un cert angle d'atac. De fet, les ales corbades amb un angle d'atac nul creen càrrega aerodinàmica.

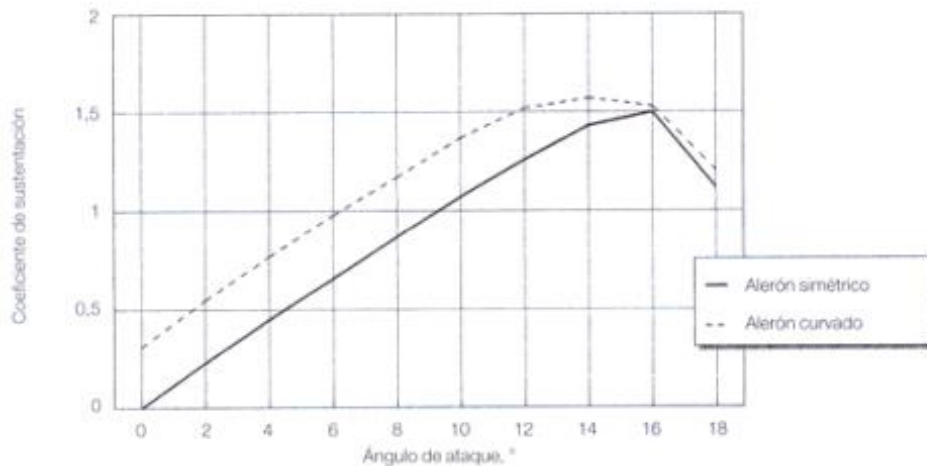


Figura 6.6: L'efecte de la curvatura en la sustentació. [25]

Com es veu en el gràfic, una ala corbada pot entrar en pèrdua amb un angle menor que una ala simètrica. No obstant, els alerons simètrics creen menys coeficient de sustentació per un cert angle d'atac.

Un cop analitzat el perfil de l'ala es busca trobar la màxima eficiència aerodinàmica a partir dels coeficients C_L i C_D . Les eficiències ja es tenen definides per defecte al fer assajos amb diferents angles d'atac i obtenint els coeficients C_L i C_D en funció de l'angle α . La següent figura il·lustra com varia l'eficiència del perfil GOE 225 al variar el Reynolds. A més a més, amb quin angle s'obté la màxima eficiència.

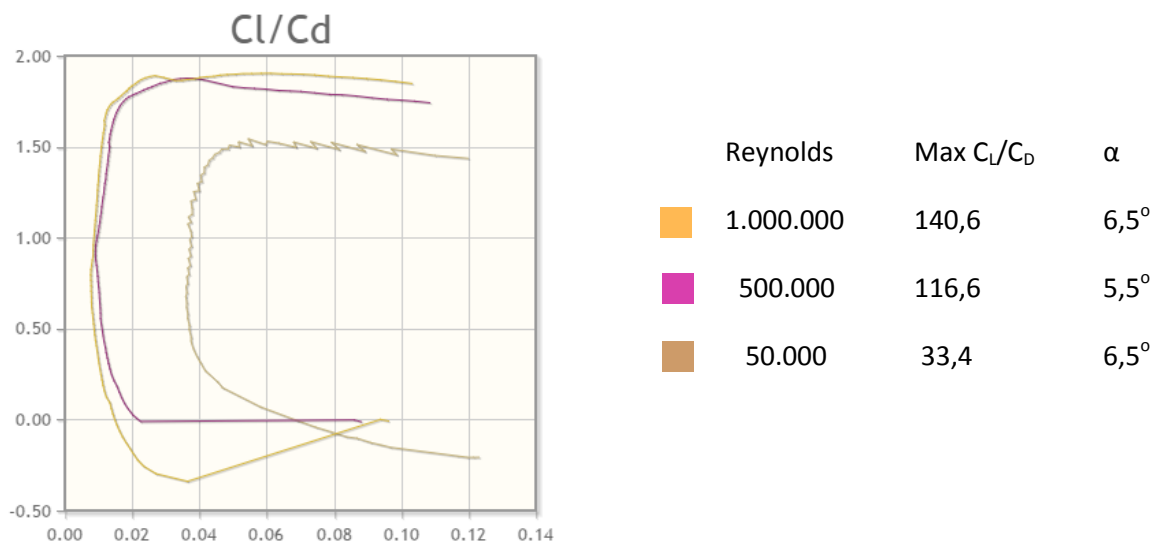


Figura 6.7: Representació dels coeficients C_D a les abscisses i C_L a les ordenades. [26]

Per concloure, per a dissenyar un aleró d'un sol component amb la màxima eficiència s'han de tenir present els següents apartats:

1. Un angle d'atac baix per aconseguir poca càrrega aerodinàmica i poca resistència i un angle d'atac alt fins un màxim de $14-16^\circ$ per obtenir major càrrega aerodinàmica sense poder evitar una elevada resistència.
2. Poc gruix per poca càrrega aerodinàmica i poca resistència i fins a un gruix de $t=0,12 \cdot c$ per a una major càrrega.
3. Poca curvatura, al voltant de $0,3 \cdot c$, per poca càrrega aerodinàmica i una curvatura major, entre $0,05 \cdot c$ i $0,15 \cdot c$, per a una major càrrega.
4. Radi del caire d'atac entre el 1-3% de la corda.

Les escuderies intenten adaptar-se el millor possible als circuits modificant aquests paràmetres i proporcionar al pilot les millors prestacions possibles.

6.2 Alerons de dos elements

A vegades és interessant, o fins i tot necessari, crear més càrrega aerodinàmica de la que ens pot aportar un aleró simple. Com s'ha vist anteriorment, en l'equació bàsica de la càrrega aerodinàmica $= 1/2 \rho A C_L v^2$, és evident que per augmentar la càrrega aerodinàmica s'ha d'augmentar l'àrea o el coeficient de sustentació a una determinada velocitat. En la majoria de competicions, com pot ser la Fórmula 1, es limiten les dimensions dels alerons i és interessant explotar al màxim possible la llibertat permesa sense perjudicar l'eficiència dels alerons. Però a vegades hi han paràmetres no limitats i poden ser perjudicials a la hora d'excedir-se. Un cas clar és amb el de la corda dels alerons. Al no estar limitada un pot pensar en utilitzar la més gran possible que admeti el cotxe però el problema apareix quan la relació d'aspecte és baixa (envergadura entre corda) fent que sigui menys eficaç en termes de sustentació i resistència. Una alternativa és mantenir la relació d'aspecte però intentar augmentar el C_L . Es pot aconseguir utilitzant un perfil d'un sol element amb major curvatura o utilitzant un aleró de varis elements.

El disseny més senzill és el de dos elements on el pla principal va acompanyat d'un *flap*. Al afegir un *flap* a un aleró d'un sol element pot ocórrer:

- Augmentar l'àrea de la planta creant més càrrega aerodinàmica.
- La curvatura efectiva de l'ala de dos elements es veu augmentada, per tant, també augmentarà la càrrega a un cert angle d'atac.
- La interacció entre el pla principal i el *flap* genera més càrrega mitjançant la modificació del flux de l'aire.

Existeixen dos geometries comuns per alerons de dos components:

- *Flap extern*: Més fàcil de construir atès que utilitza un pla principal senzill.
- *Flap de ranura* o *flap de tipus Fowler*: Més difícil de fabricar degut a la seva forma més complexa que permet que el *flap* es mogui podent pujar, baixar i rotar.

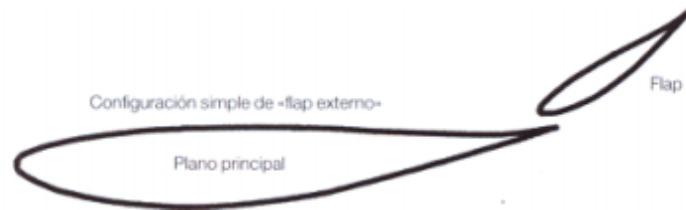


Figura 6.8: Aleró de dos elements amb una configuració de *flap extern*. [25]



Figura 6.9: Aleró de dos elements amb una configuració de *flap de ranura* o *flap Fowler*. [25]

6.3 Alerons amb varis elements

De la mateixa manera que es pot augmentar la càrrega aerodinàmica afegint un *flap* a un aleró simple, es pot anar augmentant el coeficient C_L afegint més *flaps*.

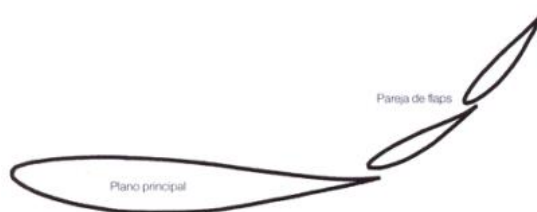


Figura 6.10: Aleró amb dos *flapsexterns*. [25]

A vegades, alerons amb molta càrrega aerodinàmica poden patir la separació del flux en el caire d'atac. Quan aquest fenomen apareix és necessari afegir una aleta en el caire d'atac.



Figura 6.11: Aleró amb tres elements amb una aleta en el caire d'atac. [25]

Per concloure, es pot fer una gràfica on es vegi l'augment dels coeficient de sustentació a la hora d'anar afegint components a l'aleró:

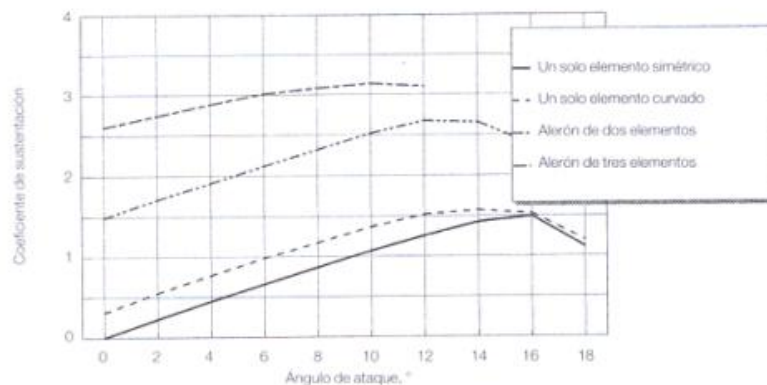


Figura 6.12: Comparativa del coeficient de sustentació amb els diferents alerons. [25]

6.4 Aleró davanter

L'aleró davanter d'un Fórmula 1 representa al voltant del 25% de càrrega aerodinàmica total del monoplaça. Actualment mesura 1,8 metres d'ample i té una part central de 50cm de formes obligatòries en base a una plantilla de la FIA. Està format per fibra de carboni i és la primera part del monoplaça en entrar en contacte amb el flux d'aire. El flux d'aire que arriba a l'aleró davanter és el més gran en comparació en el que arriba a les altres parts del cotxe degut a que és el que incideix amb menor pertorbació.

Les funcions principals dels alerons davanters són:

- Generació de *downforce*.
- Separar convenientment el flux de l'aire incident sobre les rodes davanteres.
- Adequar el flux que passa per sota el terra i als pontons de refrigeració.
- Adequar el flux al casc del pilot i a l'entrada d'aire del motor.

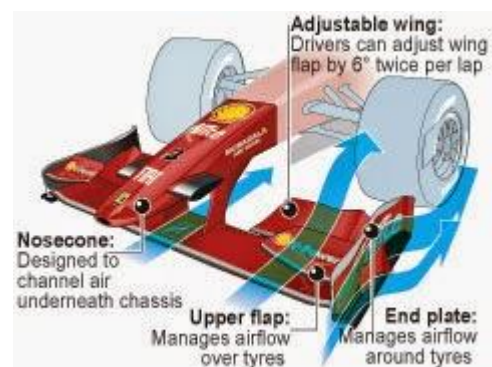


Figura 6.13: Aleró davanter del Ferrari. [27]

Per a poder dirigir el flux de l'aire està equipat amb *flaps* i *winglets*.

El nou reglament per a la temporada 2015 presenta una modificació en l'article 15.4.3 per a eliminar les protuberàncies de l'estructura d'impacte frontal vistes aquest any en els cotxes de la Fórmula 1 constant de 3 punts bàsics:

- La FIA ha centrat la idea en una forma cònica simètrica fins a 150mm darrera la punta de l'aleró.
- La longitud de l'estructura de l'aleró ha de tenir una alçada de 850mm respecte la línia central de les rodes davanteres, 50mm més que la temporada anterior, restringint l'efecte Venturi i per seguretat.
- Els punts 'a' i 'b' han d'estar a una distància de 100mm evitant dissenys com els de McLaren, ForceIndia o Toro Rosso entre d'altres.

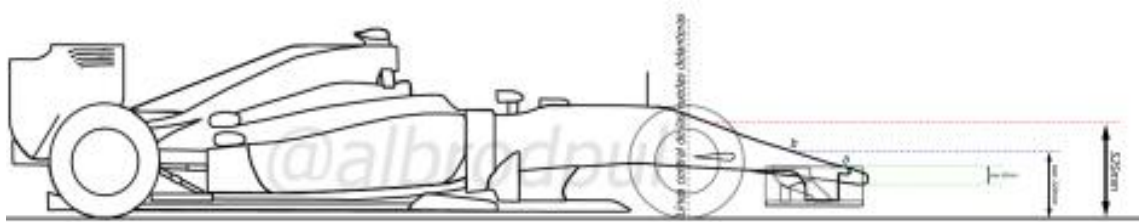


Figura 6.14: representació dels punts 'a' i 'b' d'un monoplaça. [28]

Els equips han d'ajustar l'aleró davanter adequadament segons les característiques de cada circuit per poder proporcionar la càrrega aerodinàmica òptima i necessària.

6.5 Aleró posterior

La fórmula 1 utilitza alerons al darrera del monoplaça des dels anys 60. La seva funció és ajudar a les rodes posteriors a millorar el pas per corba, a la tracció i a la frenada. Aquest component crea la meitat de càrrega que aguanten les rodes posteriors degut a que l'altre meitat la crea el difusor. Tot i això, és un element molt important en l'aerodinàmica del cotxe creant molt *downforce* i drag, és a dir, càrrega i resistència respectivament.

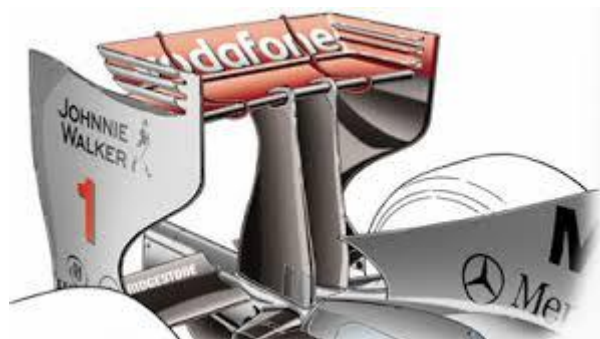


Figura 6.15: Aleró posterior de l'escuderia McLaren. [29]

Per tant, s'ha d'ajustar correctament per cada circuit perquè com més carrega ofereixi (millor pas per corba), més resistència presentarà (serà més lent a les rectes). En alguns circuits és preferible un angle d'atac baix (circuits ràpids com Monza), i d'altres alt (circuits lents com Mònaco).

Com es pot veure és un element molt important i la FIA ha anat limitant la seva eficiència al llarg dels anys. Actualment sol pot ser 75cm d'ample i està limitat a dos elements: al pla principal i al *flap*.

Segons el nou reglament de la Fórmula 1 instaurat per a la temporada 2014:

- L'envergadura d'ala es manté, no ho fa de la mateixa manera l'alçada que es veu reduïda 20mm respecte la temporada anterior. L'alçada passa a mesurar 200mm. (article 3.10.2).
- La separació entre el *flap* i el pla principal ha d'estar entre els 15mm i els 65mm respecte els 10mm i 50mm que tenia. El centre de rotació del *flap* ha d'estar a 20mm del caire de sortida.
- Es prohibeix l'aleta situada sobre els llums posteriors anomenada *beamwing*.
- Es prohibeix la barra situada sobre el pla de l'aleró principal.

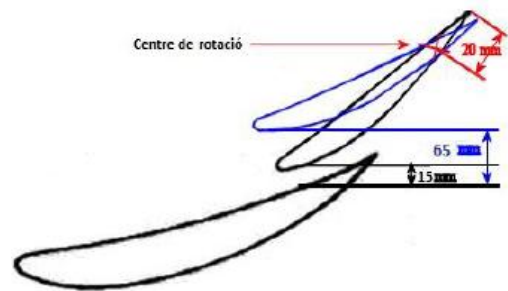


Figura 6.16: Pla principal i *flap*. [30]

A més a més, també hi ha limitacions per quan l'aleró està sotmès a forces:

- Article 3.17.6: Quan s'aplica una càrrega de 500N en 3 punts equidistants a una alçada de 195mm no pot presentar un desplaçament horitzontal superior a 5mm.
- Article 3.17.7: Quan s'aplica una càrrega de 200N en qualsevol punt no pot presentar un desplaçament vertical superior a 2mm.

6.5.1 DRS

L'any 2011 la FIA va incorporar al reglament tècnic la obligatorietat als equips d'incloure un nou element aerodinàmic, el DRS (DragReduction System) o més conegut com aleró posterior mòbil. L'objectiu era propiciar més avançaments i, per tant, més espectacles. Aquest és el cinquè any que s'utilitza aquest sistema en els monoplares i així s'ha aconseguit augmentar el nombre d'avançaments en les carreres.

6.5.1.1 En què consisteix?

Consisteix en un ajust en l'aleró posterior que facilita els avançaments a pista. Els pilots premen un botó en el volant per activar-lo. En aquest moment, la meitat superior de l'aleró s'obre cap endavant. Aquesta obertura permet reduir la resistència amb el vent el que fa que es redueixi la càrrega aerodinàmica i augmenta la velocitat.



Figura 6.17: Volant Fórmula 1. [31]

El nom original és “Drag reduction System” (sistema de reducció de resistència a l’avanç) d’aquí a que es conegui com a DRS. Com la seva incorporació va ser per millorar els avançaments només està permès utilitzar-lo en els llocs més fàcils, a les rectes. La FIA ha limitat el seu ús només si el monoplaça està a menys d’un segon del pilot del davant i el cotxe del davant només el pot utilitzar si està a menys d’un segon del que el precedeix.



Figura 6.18: DRS desactivat en el Mercedes GP. [32]



Figura 6.19: DRS activat en el Mercedes GP. [32]

6.5.1.2 Funcionament del DRS

Com s'ha dit anteriorment, és el pilot qui activa el dispositiu a través d'un botó del volant. També pot estar situat amb un pedal situat a l'esquerra del fre com la instal·lació que utilitza Ferrari. De manera simultània, el *flap* superior de l'aleró posterior, gràcies a un sistema hidràulic, s'eleva permeten el pas de l'aire entre el pla principal i el *flap* de l'ala del darrera. Al tenir la forma de l'ala invertida, l'aire s'accelera al passar per la ranura, fa que l'adherència del monoplaça al asfalt disminueixi i aquest sigui més ràpid. De la mateixa manera la velocitat punta dels monoplaques millora entre 10 i 15 km/h al reduir la resistència a l'aire, però, el cotxe té menys càrrega aerodinàmica. Tot i això, l'ús del DRS té un pes addicional de quatre kilograms.

El mecanisme d'obertura del DRS utilitza sistemes de control hidràulic o elèctric. La pressió hidràulica s'encamina cap a una vàlvula que al obrir-se condueix la pressió cap a una canonada on al final té un actuador. L'actuador és un pistó dins d'un cilindre que es mou ràpidament quan s'aplica pressió. Quan es demana que el DRS tanqui la pestanya de l'aleró posterior, la vàlvula es tanca per permetre que la pressió de dins el cilindre alliberi la pressió de la solapa.

Totes les estratègies de la maquinaria de control hidràulic són les mateixes que els sistemes de control hidràulic de tot el cotxe, de manera que el circuit del DRS simplement és una extensió del circuit hidràulic del monoplaça.

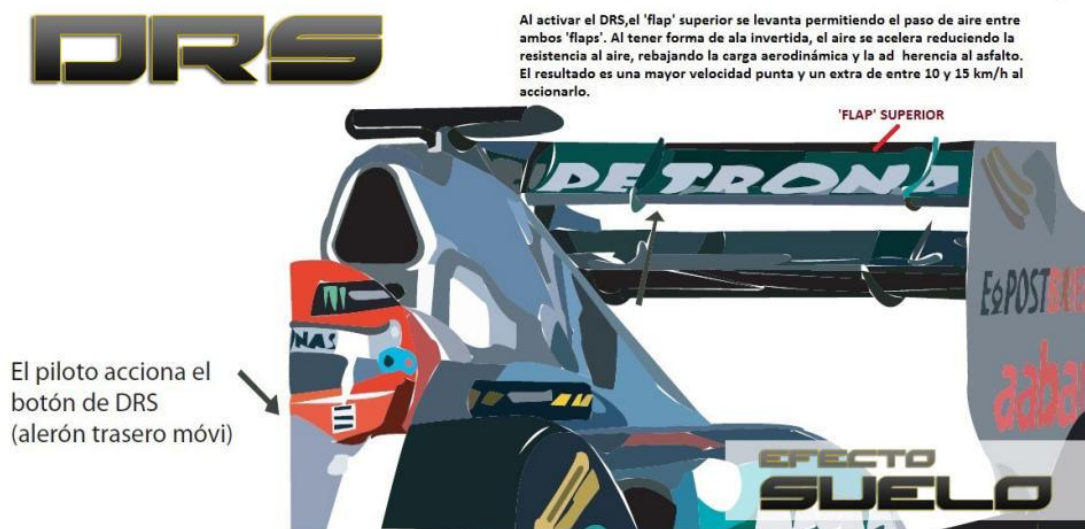


Figura 6.20: Sistema DRS. [31]

6.5.1.3 Reglament del DRS

Al ser un sistema tant eficaç i alhora perillós pels pilots el reglament de la FIA és molt rigorós:

- Només pot ser utilitzat quan hi ha una distància entre el pilot i el seu predecessor de menys de 1 segon al passar per la zona de detecció posicionada a la corba anterior de la recta on està permès el seu ús.
- És necessari haver realitzat 3 voltes per poder beneficiar-se d'aquest sistema.
- Està totalment prohibit el seu ús en condicions de pluja.
- També està totalment prohibit quan hi ha un accident o quan el *safety car* està a pista.
- Quan el *safety car* marxa, s'han de donar 3 voltes abans de poder-lo tornar a utilitzar.
- És important que només pot utilitzar el DRS el monoplaça que intenta avançar, mai el que es defensa.
- Gairebé tots els circuits tenen dos zones de DRS, menys alguns circuits petits com el de Mònaco.

6.5.1.4 Tipus de DRS

Per a activar i desactivar el DRS dels monoplaços s'utilitzen 3 tipus de sistemes, tots ells a lliure elecció de les escuderies:

- **Push up:** Consisteix en un pistó hidràulic que ajuda a elevar verticalment el DRS, fent-lo rotar respecte el seu punt fix. Aquest sistema hidràulic, que puja des de la caixa de canvis, interfereix directament amb l'aerodinàmica i és per això que els equips no l'utilitzen.

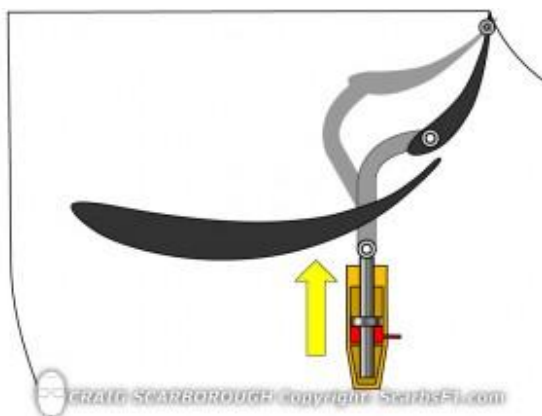


Figura 6.21: Sistema *Push up*. [33]



Figura 6.22: Representació sistema *Push up*. [33]

- **Pods & Rockers:** Aquest sistema consta d'un triangle i un pistó hidràulic muntat a la superfície superior de l'ala posterior. Consisteix en fer passar les línies hidràuliques a través de la caixa de canvis, de la biga, de la placa de terminal de l'aleró i de l'ala principal fins arribar al pistó. Com es pot veure, el sistema és més sofisticat que el *push up*, passant per diferents punts per no haver de modificar l'aerodinàmica del monoplaça.

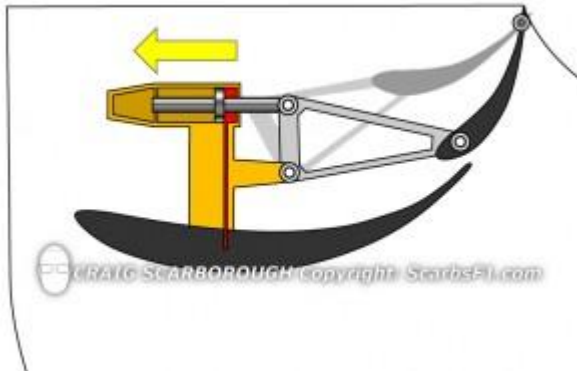


Figura 6.23: Sistema *Pods & Rockers*. [33]



Figura 6.24: sistema *Pods & Rockers*. [33]

- **Pod Pull:** Actualment és el sistema més utilitzat per les escuderies atès que és una millora del sistema Pods & Rockers però no necessita tants elements per a activar-lo. No obstant, requereix més esforç hidràulic per a la mateixa velocitat d'obertura perquè no disposa de l'eix del balancí que sí té el sistema anterior. Això no implica grans inconvenients degut a que la caixa de canvis ja disposa d'alta pressió i, per tant, no és un gran problema pel sistema hidràulic com tampoc ho és pels dissenyadors.

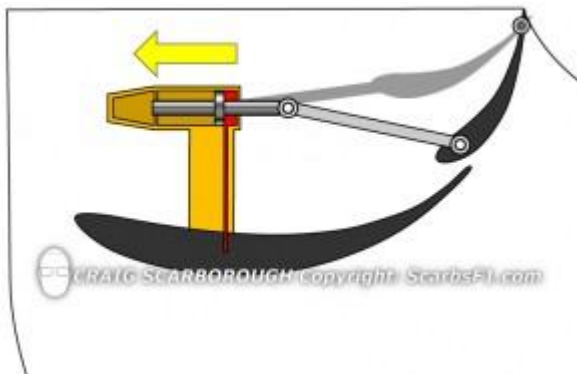


Figura 6.25: Sistema *Pod Pull*. [33]



Figura 6.26: Representació sistema *Pod Pull*. [33]

7. Disseny, simulació i anàlisi del DRS.

7.1 Software

Per poder estudiar el comportament aerodinàmic tant quantitativament com qualitativament del DRS d'un aleró d'un Fórmula 1 és necessària la experimentació. No obstant, al ser tant costós és important fer uns anàlisis previs mitjançant software informàtic. A partir d'ajuda informàtica els enginyers poden crear i estudiar diferents models i obtenir els millors resultats possibles adequant-se a les necessitats requerides.

De la pàgina Airfoil tools s'han importat les dades dels diferents perfils d'ala utilitzats i amb el programa Solidworks s'han dissenyat. Un cop dissenyats els diferents perfils s'ha procedit a estudiar-los aerodinàmicament mitjançant el programa Ansys.

Aquest programa permet solucionar els diferents casos d'estudi aerodinàmics. La seva utilització dins d'aquest projecte és degut a que al llarg del grau s'ha utilitzat, per tant, es tenen uns mínims coneixements per començar a treballar.

Per poder realitzar els estudis dels perfils s'han de seguir 3 passos: *Preprocessor*, *solucionador* i el *Postprocessor*.

7.1.1 Preprocessor

7.1.1.1 Disseny

Primerament s'inicialitza el programa Ansys el qual ofereix diferents maneres de realitzar els estudis. Entre les dues parts per fer-los, CFX i CFD, s'ha decidit treballar amb CFX.

Un cop decidit com es treballarà s'inicia un nou estudi CFX.

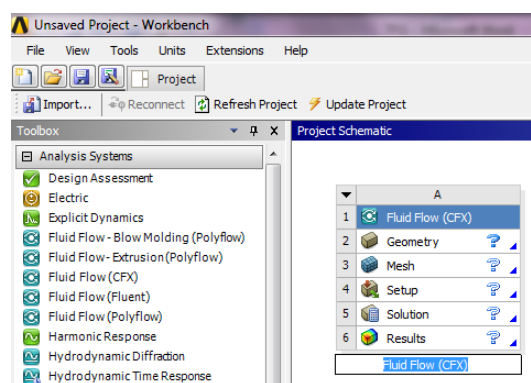


Figura 7.1: Inicialització del CFX.

Com es pot veure en la imatge adjunta, el primer pas és introduir la geometria que com s'ha dit anteriorment s'ha dissenyat mitjançant el programa SolidWorks.

Les dades de la pàgina Airfoil Tools són unes coordenades que van seguint el perfil desitjat, les quals són normalitzades amb una amplada de 1000mm i s'importen al SolidWorks amb l'eina corba de 3 eixos a un croquis. Un cop dibuixades les corbes necessàries, amb les mesures desitjades i l'angle d'atac oportú, s'extrueixen deixant el perfil d'ala buit dins un rectangle de dimensions grans (10 vegades la longitud de corda c i 10 vegades el gruix màxim t de l'ala). Un cop creada la geometria es guarda amb el format IGS, el que reconeix l'Ansys.

Un cop fets els passos anteriors, s'importa la geometria. A continuació procedim a mallar el model.

7.1.1.2 Mallat de la geometria

Aquest pas és important en qualsevol simulació atès que el seu objectiu és dividir la geometria en diferents nodes. De cada node podem extreure diferents paràmetres com la posició, velocitat, pressió, etc. Les mesures del mallat és important perquè com més petites siguin, més precisió s'obindrà. En els estudis fets en aquest projecte s'ha treballat amb una mida màxima de mallat de 0,03m i en les parts més importants i on es requereix més precisió com els voltants dels perfils d'ala s'ha refinat, és a dir, s'han reduït les dimensions del mallat obtenint més nodes i, per tant, més precisió.

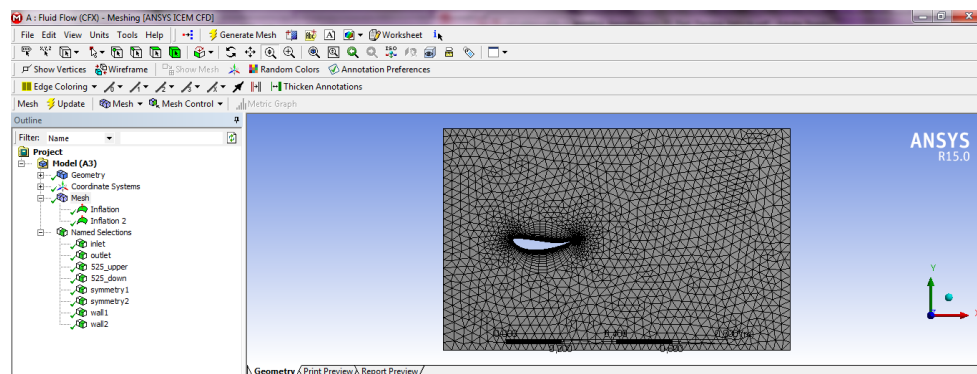


Figura 7.2: mallat de la peça Goe525.

Cada superfície s'ha d'anomenar en funció del seu comportament dins l'estudi. En el programa CFX trobem 5:

- Element entrada (*inlet*): Aquest element introdueix el fluid amb les condicions inicials que s'imposen en les condicions de contorn com la velocitat i la pressió. Aquesta superfície és perpendicular a la direcció del flux i en l'estudi és la cara més propera a l'ala.
- Element sortida (*outlet*): És l'element encarregat de retirar el fluid el qual, davant una possible pèrdua de càrrega dins l'estudi, pot limitar la pressió de sortida. És l'element més allunyat de l'objecte d'estudi i perpendicular a la direcció global flux.

- Element paret (*wall*): Aquest element serveix per representar superfícies sòlides on s'adhereix el flux les quals influeixen directament al seu comportament.
- Element simètric (*symmetry*): Les condicions de simetria s'imposen a les cares frontals per evitar les pèrdues laterals que tindria un aleró sense les derives laterals, per tant, limita el flux a estar contingut dins de la superfície delimitada.
- Element d'obertura (*opening*): Aquest element no ha estat utilitzat al llarg del projecte. No obstant, el programa CFX ens dona la oportunitat de utilitzar-lo. La seva utilitat resideix quan el fluid pot sortir del recinte d'estudi i alhora entrar.

7.1.1.3 Condicions de contorn

Per poder realitzar els estudis de la manera més real possible s'han adequat les condicions de contorn a les que ens trobaríem en un dia de gran premi. Per fer-ho s'han de tenir en compte certs factors:

- Velocitat del fluid: El fluid estudiat és l'aire a 89m/s (Mach 0,26). Els monoplaques de la Fórmula 1 arriben als 320km/h en la majoria dels circuits i és per això que s'escull aquesta velocitat.
- Pressió: 101325 Pa. S'ha escollit la pressió atmosfèrica que és la pressió que exerceix l'atmosfera terrestre al nivell del mar.
- Temperatura: 298,15K, és a dir, 25°C.
- Densitat constant: Com que el nombre de Mach és menor que 0,3 (Mach 0,26), es considera el fluid incompressible i, per tant, ens trobem en règim subsònic. En segon lloc, les variacions d'altura i temperatura en l'estudi són mínimes i menyspreables.
- Fluid tridimensional: Per poder estudiar el fluid en les 3 dimensions, en les 3 components cartesianes XYZ.
- Estacionari: Com que les condicions de contorn a les que està sotmès el fluid no canvien al llarg de l'estudi es considera l'estudi en règim estacionari.
- Flux turbulent: Un model habitual per estudis aerodinàmics és el model de turbulència K-Epsilon. Aquest model s'utilitza com la base de càlculs de l'energia cinètica turbulenta i el rati de dissipació turbulenta. Degut a la turbulència hi ha un increment del transport de la quantitat de moviment i del transport de la calor en direccions normals a la superfície o normals a la component més gran de la velocitat del flux, respecte a la del cas del flux laminar. Aquest model introdueix la quantitat de moviment i del transport de la calor degut a la turbulència.
- Coeficient de sustentació (*Lift*): Per calcular aquest coeficient s'introdueix l'equació al *Output Control*:

$$C_L = -\text{force_y_Coord } 1() @ \text{airfoil} * 2 / (\text{massFlowAve}(\text{Density}) @ \text{inlet} * (\text{massFlowAve}(\text{Velocity}) @ \text{inlet})^2 * 0.6 [\text{m}] * 1 [\text{m}])$$

El signe negatiu és per poder representar el coeficient de sustentació positiu i comparar-lo amb el coeficient de resistència a l'avanç.

- Coeficient de resistència a l'avanç (*Drag*): Per calcular aquest coeficient s'introdueix l'equació al *Output Control*:

$$C_D = -\text{force_x_Coord } 1() @ \text{airfoil} * 2 / (\text{massFlowAve}(\text{Density}) @ \text{inlet} * (\text{massFlowAve}(\text{Velocity}) @ \text{inlet})^2 * 0.6 [\text{m}] * 1 [\text{m}])$$

- Nombre d'iteracions: En el *Solver Control* s'introdueixen les iteracions màximes i mínimes de l'estudi. És important que s'arribi a la solució abans d'arribar al màxim d'iteracions.

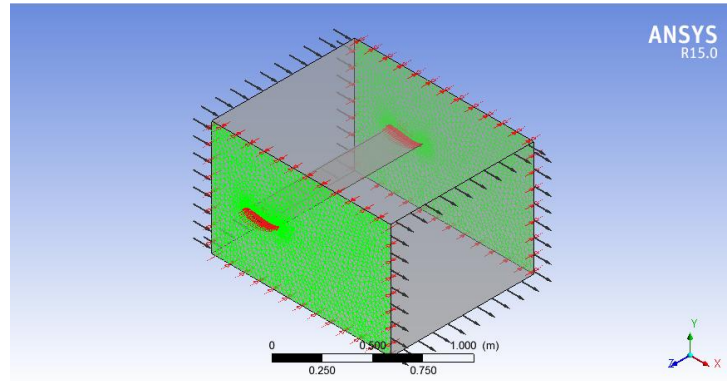


Figura 7.3: Representació de les condicions de contorn.

En la figura 7.3 es representen les condicions de contorn. La superfície de l'esquerra és l'element entrada, per on s'introdueix el fluid, i la de la dreta és l'element sortida, per on surt el fluid. Les superfícies on es veu el mallat són les superfícies de simetria i a l'interior l'objecte d'estudi, és a dir, el perfil d'ala.

7.1.2 Solucionador

La segona part del procés de simulació és l'encarregada dels càlculs de la simulació. Per defecte, només calcula les constants del model així com la solució de les equacions. És per això, que s'han introduït els coeficients C_D i C_L .

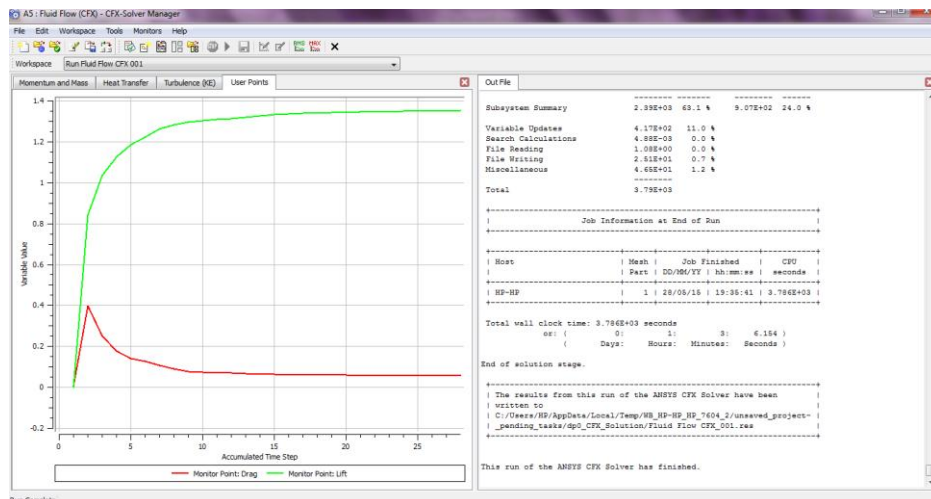


Figura 7.4: Representació del C_D i C_L al llarg de les iteracions.

7.1.3 Postprocessador

Aquesta última part serveix per visualitzar els resultats. Entre les diferents visualitzacions dels resultats podem veure la distribució de pressions i la distribució de perfils de velocitats. S'ha de determinar la superfície per representar-ho (*symmetry* frontal) i els elements a visualitzar: *Pressure Contour* (distribucions de pressions) i *Velocity Vector Plot* (vectors velocitats tangents a la trajectòria).

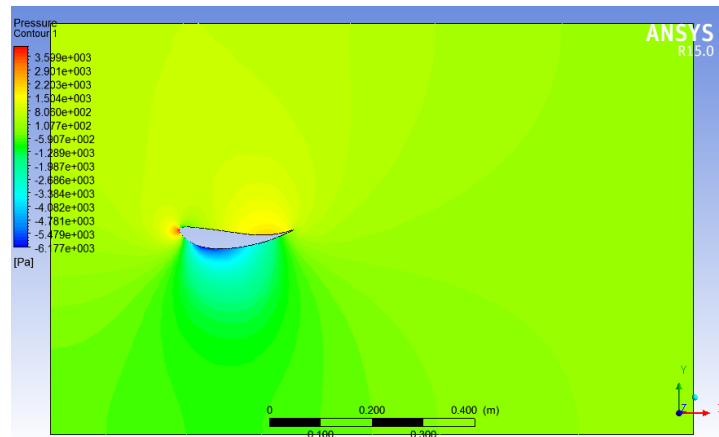


Figura 7.5: Representació de la distribucions de pressions de l'objecte d'estudi.

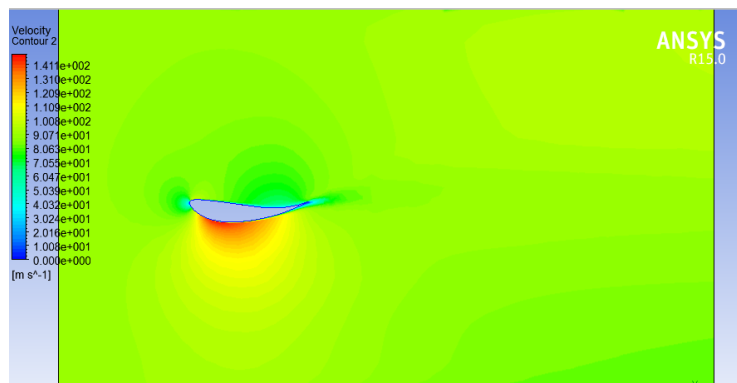


Figura 7.6: Representació de distribucions de velocitats de l'objecte d'estudi.

7.2 Estudis

Després de cada simulació s'estudiarà la distribució de pressions, la velocitat en el pla de simetria de l'aleró i l'energia cinètica de la turbulència. A més a més, es calcularà la sustentació i la resistència a l'avanç de cada aleró i la seva eficiència.

7.2.1 Pla principal més flap

Per fer els següents estudis s'ha utilitzat un perfil GOE 525 com a pla principal i un flap d'un perfil NACA 0012. Es faran diferents estudis modificant l'angle d'atac entre -9° i 12° per veure quina és la configuració més òptima. També s'estendrà a un angle d'atac de 25° per forçar a l'aleró a entrar en pèrdua i veure la distribució de pressions i el perfil de velocitats.

- Inclinió de -9° : S'escull aquesta inclinió mínima per observar com treballa l'aleró en condicions de baixa resistència a l'avanç. Amb aquesta configuració s'obtenen majors velocitats atès que el C_D és menor. La inclinió de -9° és respecte la inclinió de 0° , com totes les altres configuracions. La configuració de referència és la de 0° i és la que el pla principal és paral·lel al pla horitzontal. En totes les configuracions el flap està a 25° respecte la inclinió del pla principal.
- Inclinió de -3° : Mitjançant aquesta configuració el que es pretén és veure si el canvi mínim d'inclinió modifica la resistència a l'avanç, la càrrega aerodinàmica i la velocitat.
- Inclinió de 0° : Per aquesta configuració es busca estabilitat entre la resistència a l'avanç i la càrrega aerodinàmica permetent una pas per corba a alta velocitat.
- Inclinió de 3° : Amb una inclinió de 3° es pretén obtenir una major càrrega aerodinàmica i una major resistència a l'avanç.
- Inclinió de 9° : Amb aquesta configuració s'arriba al màxim de les prestacions que ens pot aportar aquest perfil en quan a sustentació tot i tenir un augment de la resistència a l'avanç afectant a la velocitat.
- Inclinió de 12° : A aquesta inclinió s'entra en pèrdua i es veurà com afecta als coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç.
- Inclinió de 25° : Aquesta configuració no és real però es farà un estudi de totes les forces generades. Teòricament serà el perfil amb major càrrega aerodinàmica.

7.2.1.1 Inclinió de -9°

A continuació es poden veure les representacions gràfiques dels resultats obtinguts. En la Figura 7.7 s'il·lustra la distribucions de pressió.

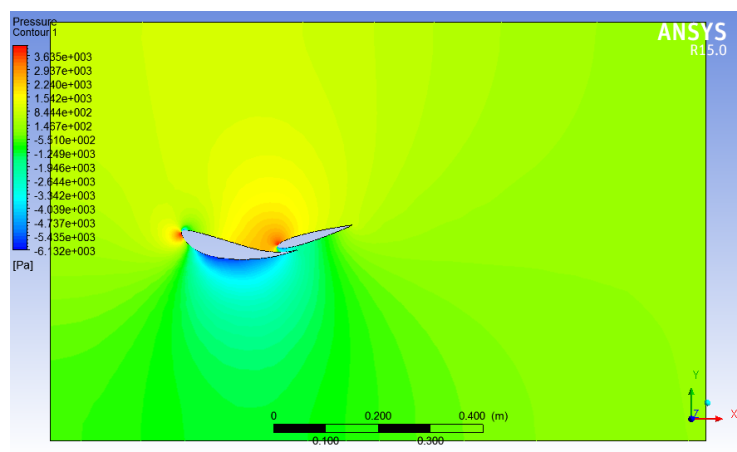


Figura 7.7: Camp de pressions amb inclinió de -9° .

Per estudiar com es comporta el flux de velocitats al llarg de l'aleró es procedeix a visualitzar el camp de velocitats en la Figura 7.8.

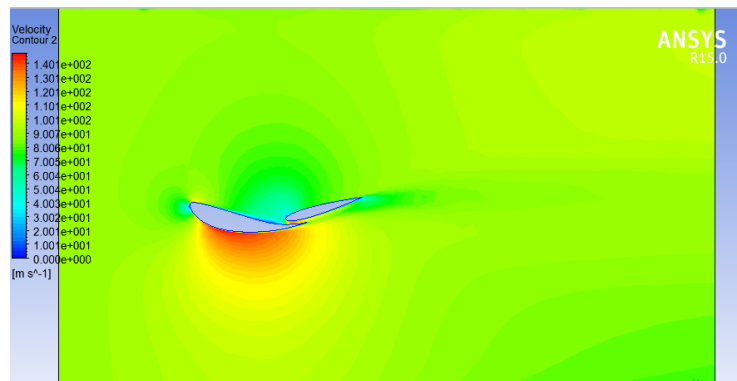


Figura 7.8: Distribucions de velocitats amb una inclinació de -9° .

A partir del camp de velocitats es pot veure com l'estela de l'aleró és petita, fet que ajudarà a tenir una menor resistència a l'avanç.

A la taula 7.1 es poden veure els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació després de la simulació.

Inclinació			Eficiència
-9°	C_D	0,0478	14,84
	C_L	0,7093	

Taula 7.1: Coeficients obtinguts en la simulació.

Per determinar quina és la configuració més òptima es pot veure l'energia cinètica turbulenta on mostra les turbulències generades per l'aleró.

Aquest factor és important perquè perjudicarà els vehicles que van per darrera atès que perjudica les seves prestacions aerodinàmiques. La Figura 7.9 mostra l'energia cinètica turbulenta amb la inclinació de -9° .

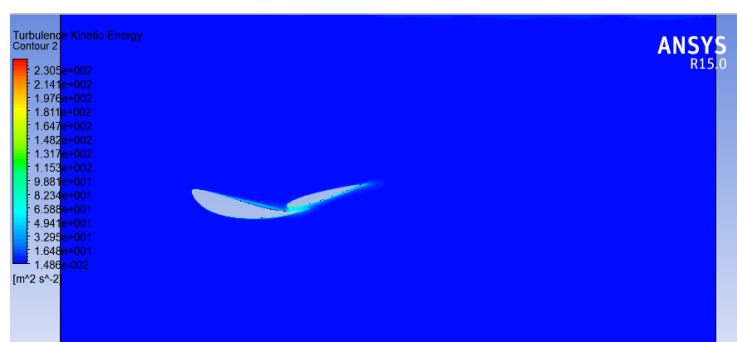


Figura 7.9: Energia cinètica turbulenta amb inclinació de -9° .

En la imatge es pot veure com les turbulències generades per aquesta configuració són mínimes, casi menyspreables.

7.2.1.2 Inclinació de -3°

En la Figura 7.10 es pot veure com el perfil de pressions varia en comparació amb la inclinació anterior. En aquesta configuració les pressions a la part superior del perfil són superiors respecte el cas anterior i menors a la part inferior. Aquesta variació repercuteix en les forces generades pel perfil presentant una major càrrega aerodinàmica.

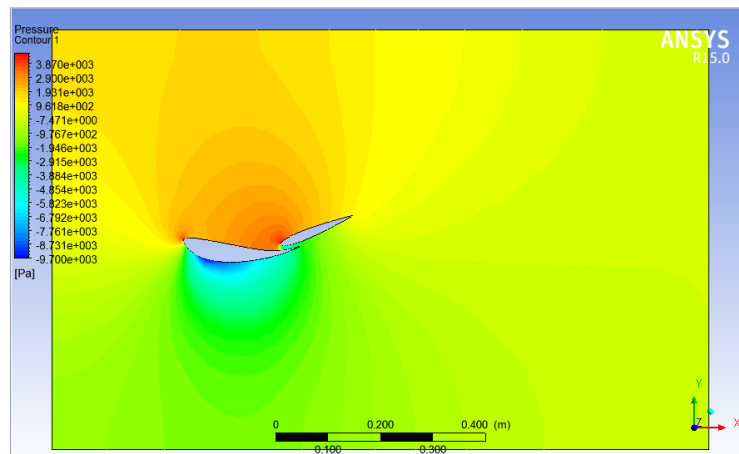


Figura 7.10: Camp de pressions amb inclinació de -3° .

La Figura 7.11 representa el perfil de velocitats i com les màximes velocitats són superiors respecte la inclinació de -9° .

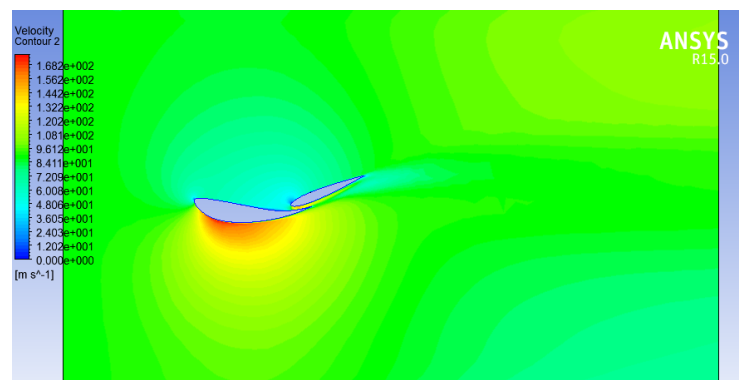


Figura 7.11: Distribucions de velocitats amb una inclinació de -3° .

L'estela és molt similar a la de la inclinació del primer cas. En la Taula 7.2 analitza els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació de la simulació.

Inclinació			Eficiència
-3°	C_D	0,0884	12,84
	C_L	1,3516	

Taula 7.2: Coeficients obtinguts en la simulació.

A partir dels valors obtinguts es pot veure que els valors són similars amb el cas anterior. Tot i això, els coeficients augmenten mentre que l'eficiència disminueix.

7.2.1.3 Inclinació de 0°

En la Figura 7.12 es pot veure com la distribució de pressions és molt semblant al cas de -3° degut a la reduïda variació de l'angle d'inclinació. Com es pot anar veient, conforme es va augmentar la inclinació, els coeficients de resistència a l'avanç i el de sustentació van augmentant. No obstant, l'eficiència de l'aleró disminueix.

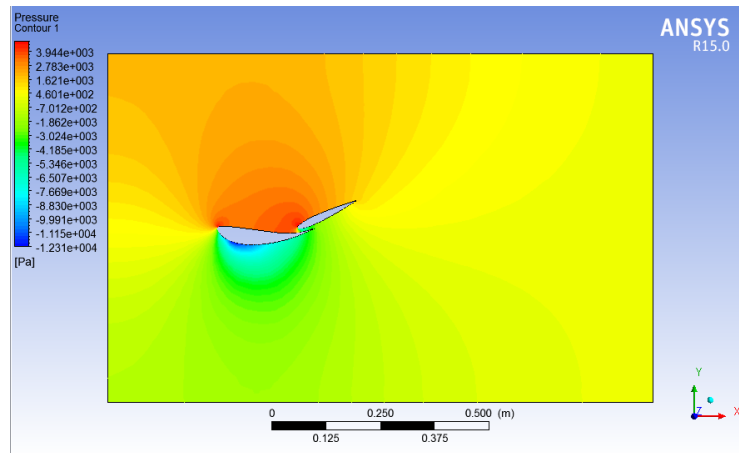


Figura 7.12: Camp de pressions amb inclinació de 0° .

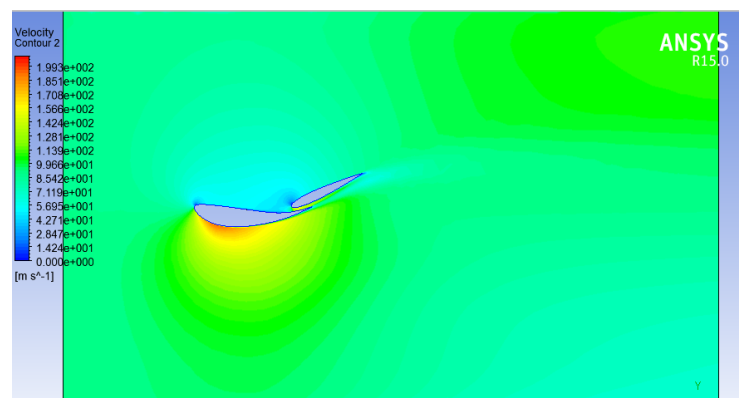


Figura 7.13: Distribucions de velocitats amb una inclinació de 0° .

Si es relaciona el camp de pressions i la distribució de velocitats es pot veure que on les pressions són menors les velocitats són majors.

En la Taula 7.3 es poden veure els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació de la simulació.

Inclinació			Eficiència
0°	C_D	0,1164	11,61
	C_L	1,1351	

Taula 7.3: Coeficients obtinguts en la simulació.

Com s'ha dit, els coeficients van augmentant i l'eficiència va disminuint conforme s'augmenta la inclinació.

7.2.1.4 Inclinator de 3°

A partir d'ara es continua simulant el perfil amb angles d'inclinator positius per veure com segueixen evolucionant els coeficients i l'eficiència així com les distribucions de pressions i el camp de velocitats. En la Figura 7.14 es representa la distribució de pressions per la configuració de 3°.

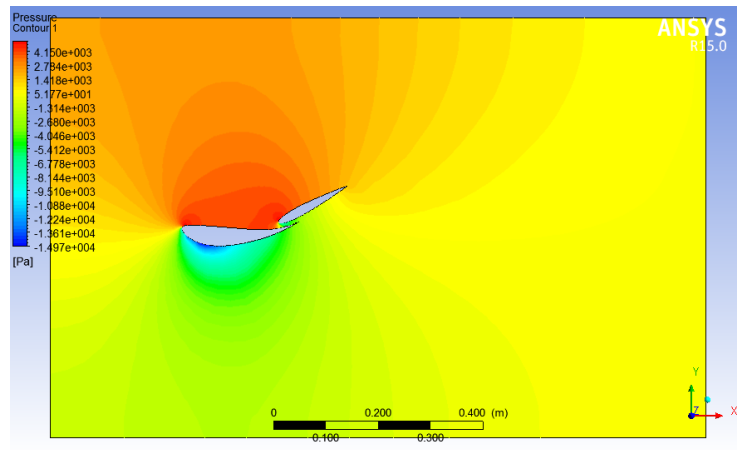


Figura 7.14: Camp de pressions amb inclinator de 3°.

Es pot veure com la distribució de pressions és molt similar a la estudiada en el cas anterior amb la configuració de 0°. En aquest últim cas s'aprecia un augment de càrrega aerodinàmica però s'haurà d'analitzar el camp de velocitats il·lustrat en la Figura 7.15.

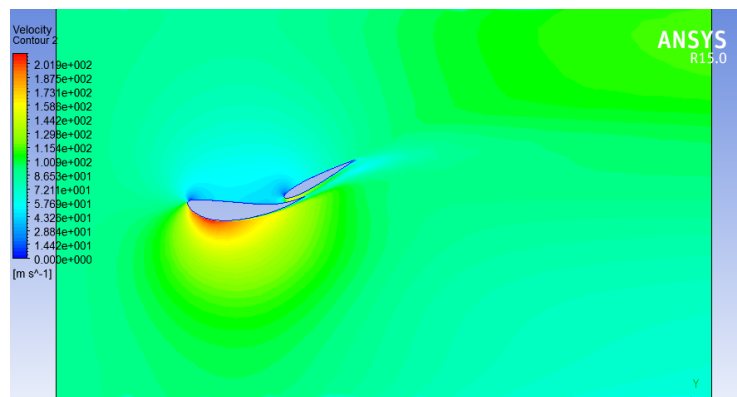


Figura 7.15: Distribucions de velocitats amb una inclinator de 3°.

Conforme es va augmentant l'angle de inclinator augmenten les velocitats a la part inferior del pla principal de l'aleró i conforme ens anem allunyant disminueix.

A la Taula 7.4 es poden veure els coeficients de resistència i sustentació de la simulació.

Inclinator			Eficiència
3°	C_D	0,1542	10,11
	C_L	1,5595	

Taula 7.4: Coeficients obtinguts en la simulació.

En la Figura 7.16 es pot veure com l'energia cinètica turbulenta a darrera del flap encara és petita, per tant, la turbulència encara és menyspreable.

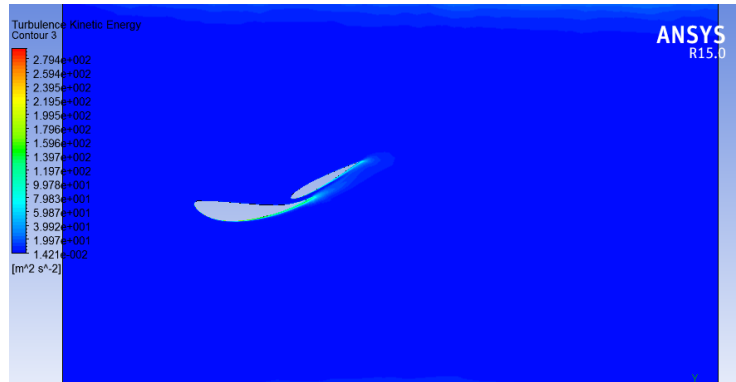


Figura 7.16: Energia cinètica turbulenta amb inclinació de 3°.

7.2.1.5 Inclinació de 9°

Amb aquesta inclinació s'assoleix el màxim coeficient de sustentació de l'aleró compost per aquests dos perfils d'ala. Com s'ha anat veient al llarg de l'estudi, la resistència a l'avanç seguirà augmentant conforme s'augmenta l'angle d'inclinació. A continuació es mostra la distribució de pressions i el camp de velocitats per la configuració de 9°.

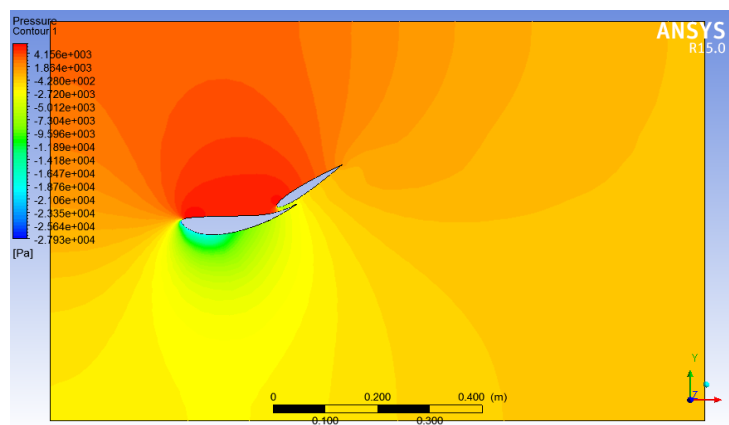


Figura 7.17: Camp de pressions amb inclinació de 9°.

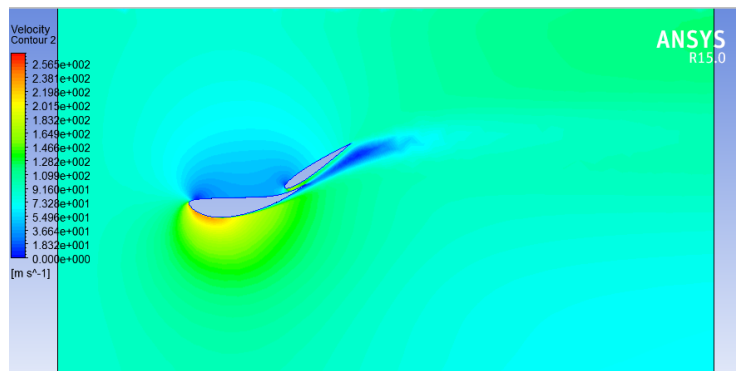


Figura 7.18: Distribucions de velocitats amb una inclinació de 9°.

A partir del camp de velocitats es pot veure com l'estela cada cop és més present i més significativa. Això perjudicarà a les prestacions de l'aleró. Tot i això, és important observar l'energia cinètica turbulenta per veure les seves magnituds.

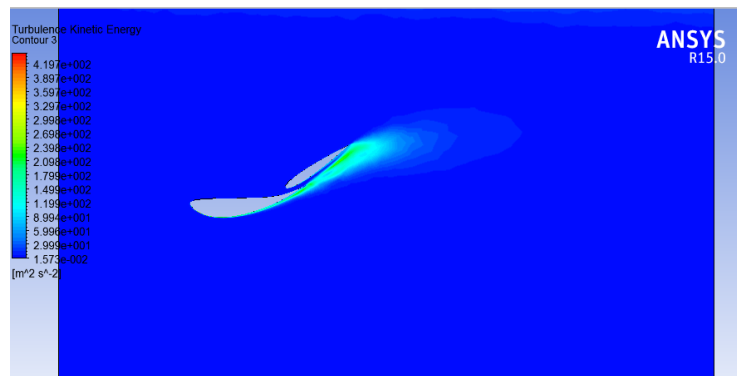


Figura 7.19: Energia cinètica turbulenta amb inclinació de 9°.

Amb la Figura 7.19 es pot veure com l'estela que deixa el perfil d'aleró amb una inclinació de 9° darrera és destacable. Per veure si afecta l'estela originada es procedeix a estudiar els coeficients.

Inclinació			Eficiència
9°	C_D	0,2642	6,93
	C_L	1,8318	

Taula 7.5: Coeficients obtinguts en la simulació.

En la Taula 7.5 el coeficient de sustentació és el més elevat en tot l'estudi, per tant, aquesta configuració seria la més òptima per circuits on és necessària molta càrrega aerodinàmica i no és tant important la resistència a l'avanç. Un exemple seria el circuit de Mònaco on s'obtenen velocitats baixes però on són presents elevades corbes.

A partir d'ara les esteles presents darrera els alerons seran importants i es començarà a perdre molta eficiència aerodinàmica. A més a més, els coeficients de resistència es veuran afectats i començaran a augmentar.

7.2.1.6 Inclinatoria de 12°

Amb aquesta inclinació l'aleró ja ha entrat en pèrdua perdent càrrega aerodinàmica tot i augmentar la resistència a l'avanç degut a l'elevada inclinació. Veiem com afecta entrar en pèrdua a la distribució de pressions.

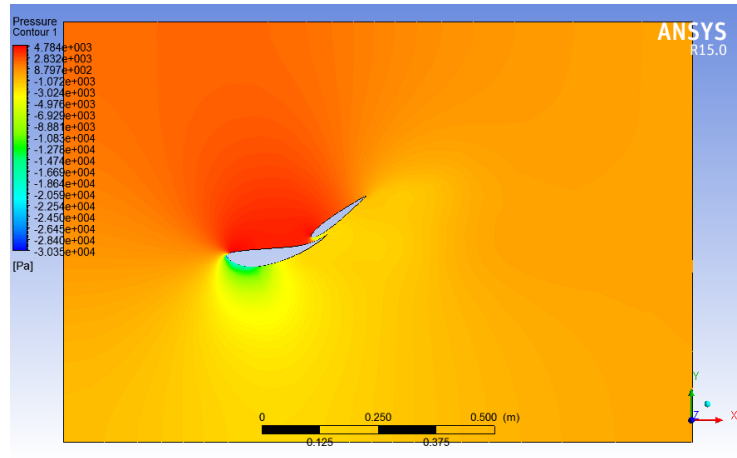


Figura 7.20: Camp de pressions amb inclinació de 12°.

Tot i entrar en pèrdua el camp de pressions segueix augmentant. A la part superior de l'aleró les pressions continuen augmentant i a la part inferior disminuint. Amb aquesta inclinació es segueix la dinàmica de l'estudi, conforme s'augmenta la inclinació la distribució de pressions augmenta.

En la Figura 7.21 s'il·lustra el camp de velocitats.

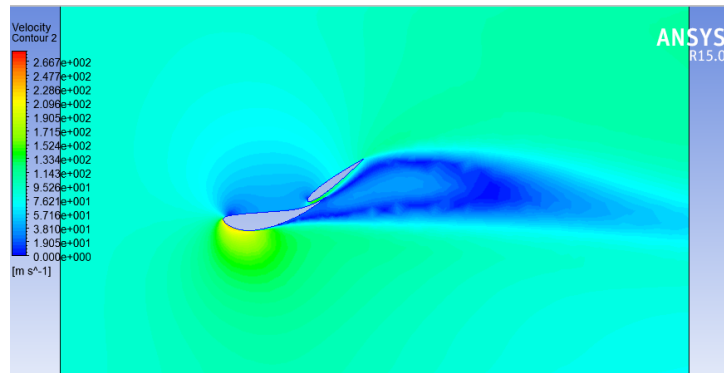


Figura 7.21: Distribucions de velocitats amb una inclinació de 12°.

El camp de velocitats de la inclinació de 12° mostra una gran estela darrera de l'aleró. Abans de treure conclusions s'analitzaran les dades obtingudes a la simulació amb l'energia cinètica turbulenta.

A la Figura 7.22 i a la Taula 7.6 es mostra, l'energia cinètica turbulenta i els coeficients extrets de la simulació, respectivament.

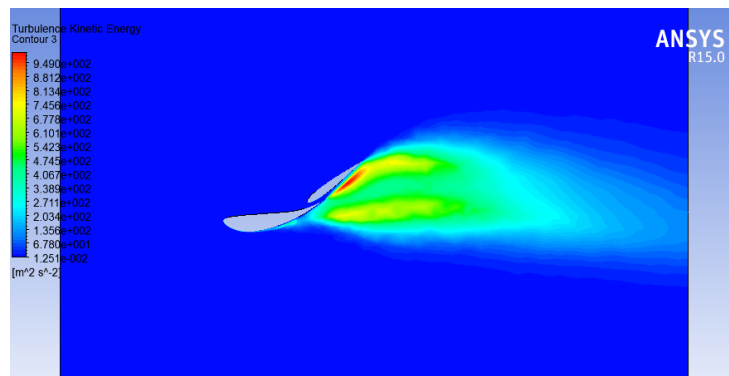


Figura 7.22: Energia cinètica turbulenta amb inclinació de 12°.

Inclinació			Eficiència
12°	C _D	0,3332	4,68
	C _L	1,5582	

Taula 7.6: Coeficients obtinguts en la simulació.

L'energia cinètica turbulenta mostra com l'estela darrera l'aleró és significativa on es comencen a crear grans turbulències.

Amb aquesta configuració l'aleró presenta elevades turbulències i les seves prestacions aerodinàmiques es veuen perjudicades.

7.2.1.7 Inclinació de 25°

Aquesta inclinació no seria utilitzada per cap escuderia i no és una configuració real. En aquest cas el que es vol estudiar és com actua l'aleró amb un angle d'inclinació suficientment gran com per crear elevades turbulències i que les seves prestacions aerodinàmiques siguin precàries.

A la Figura 7.23 i 7.24 es mostren la distribució de pressions i el camp de velocitats amb l'angle d'inclinació de 25°.

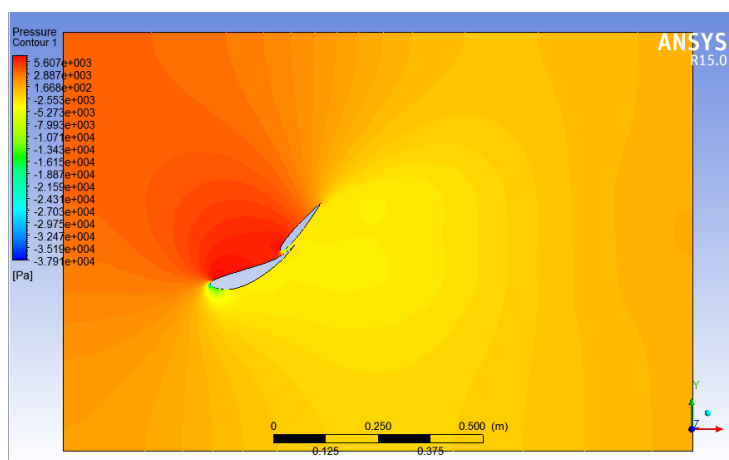


Figura 7.23: Camp de pressions amb inclinació de 18°.

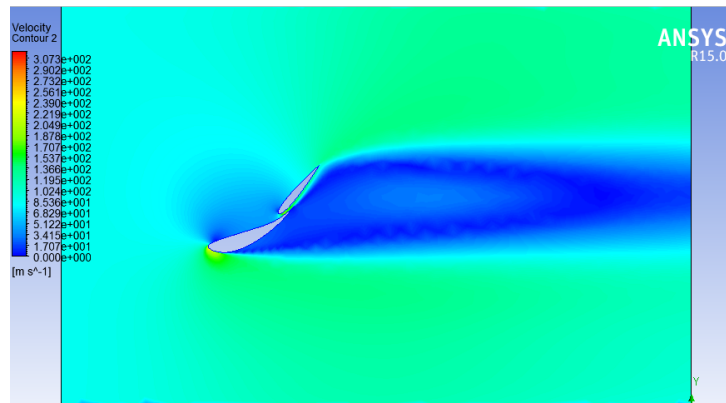


Figura 7.24: Distribucions de velocitats amb una inclinació de 25°.

Com era d'esperar, les turbulències generades són massa elevades i són les causants de que presenti gran resistència aerodinàmica. La Figura 7.25 mostra l'energia cinètica turbulenta.

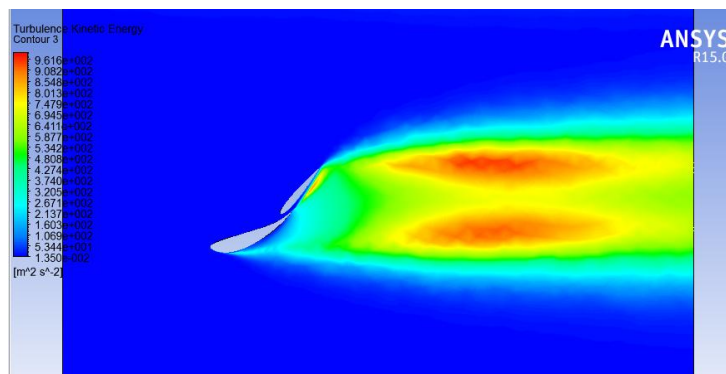


Figura 7.25: Energia cinètica turbulenta amb inclinació de 25°.

Amb l'angle de 25° sembla que la capa límit es comença a separar a prop del caire d'atac. En la Figura 7.25 es veuen grans turbulències que implicarien una elevada resistència i una reducció de l'eficiència del monoplaça i, per tant, una disminució de la seguretat del pilot en quan a pèrdua del control del vehicle, accidents...

En la Taula 7.7 es comprova com l'eficiència és la menor en tot l'estudi.

Inclinació			Eficiència
25°	C_D	1,0736	1,14
	C_L	1,2262	

Taula 7.7: Coeficients obtinguts en la simulació.

7.2.1.8 Síntesis dels resultats

Al llarg de l'apartat 7.2.1 s'han vist les configuracions més importants a nivell d'estudi de l'aleró. No obstant, s'han anat realitzant simulacions amb un interval de 3° . A la Taula 7.8 es mostra el resum dels resultats de les simulacions realitzades.

Inclinació	-9°	-6°	-3°	0°	3°	6°	9°	12°	15°	18°	25°
C_L	0,71	0,93	1,14	1,35	1,56	1,75	1,83	1,56	1,35	1,33	1,23
C_D	0,05	0,07	0,09	0,11	0,15	0,20	0,26	0,33	0,42	0,59	1,07
Eficiència	14,84	13,89	12,84	11,61	10,11	8,63	6,93	4,68	3,19	2,27	1,14

Taula 7.8: Resum dels resultats de totes les simulacions numèriques.

A la Taula 7.9 es mostren les forces implicades en l'aleró en quan a càrrega aerodinàmica i resistència a l'avanç.

Inclinació	-9°	-6°	-3°	0°	3°	6°	9°	12°	15°	18°	25°
Càrrega aerodinàmica(N)	68,6	89,9	110,2	130,5	150,8	169,1	176,8	150,8	130,5	128,5	118,9
Resistència(N)	4,83	6,76	8,70	10,63	14,50	19,33	25,13	31,89	40,59	57,02	103,4

Taula 7.9: Resum de la càrrega aerodinàmica i resistència en les simulacions numèriques.

A la taula 7.8 es pot veure com el coeficient de sustentació augmenta fins arribar als 9° . A partir d'aquesta inclinació de màxima càrrega aerodinàmica la tendència es trenca i el que fa és disminuir conforme es segueix augmentant l'angle. No passa el mateix amb la resistència. Des de els -9° la tendència és anar augmentant fins assolir el màxim als 25° .

Un factor important és que al estar més inclinat el fluid trobarà més resistència al avançar. Un altre factor és la presència de turbulències darrera l'aleró. Fins els 9° l'estela és menyspreable però a partir d'aquesta inclinació les turbulències afecten a la resistència augmentant-la.

L'eficiència, coneguda com el quocient entre el coeficient de sustentació i la resistència a l'avanç, va disminuint al llarg de l'estudi. Conforme s'augmenta la inclinació disminueix la eficiència de l'aleró.

A la Taula 7.9 es poden veure les forces presents a l'aleró a causa del fluid. Les dos forces estudiades són dependents dels corresponents coeficients. La càrrega aerodinàmica, obtinguda a partir del coeficient de sustentació, augmenta al llarg de l'estudi fins arribar al seu màxim als 9° , a partir del qual disminueix. La resistència, obtinguda a partir del coeficient de resistència a l'avanç, augmenta al llarg de les simulacions.

A continuació es procedeix a veure gràficament els valors obtinguts en les simulacions. A la Figura 7.26 es veu representat l'evolució del coeficient de sustentació al llarg de l'angle d'atac.

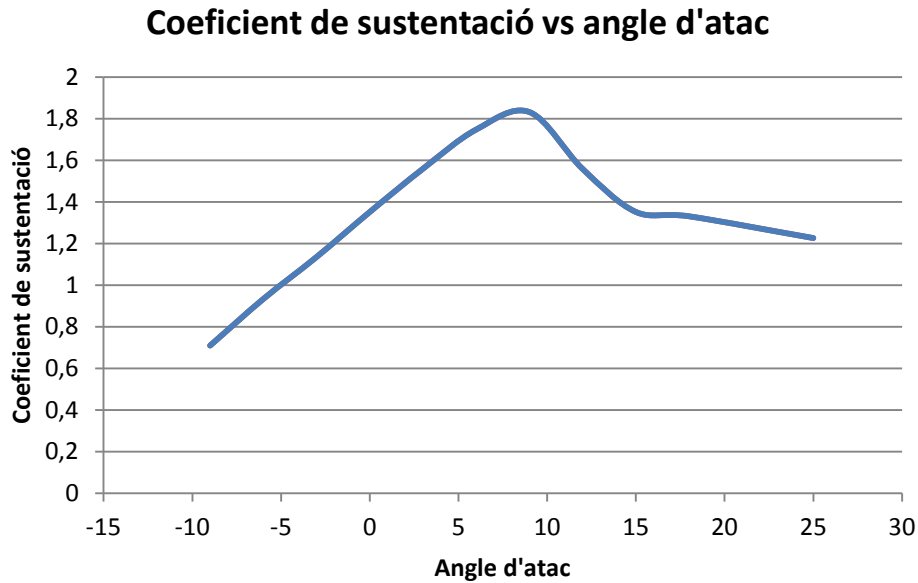


Figura 7.26: Coeficient de sustentació vs angle d'atac (°).

Com s'ha dit anteriorment, la càrrega aerodinàmica augmenta fins als 9°. A partir d'aquesta inclinació el coeficient de sustentació disminueix al tenir una pendent major.

Una vegada vist el gràfic en funció del coeficient de sustentació, a la Figura 7.27 es mostra la relació entre la resistència i l'angle d'atac.

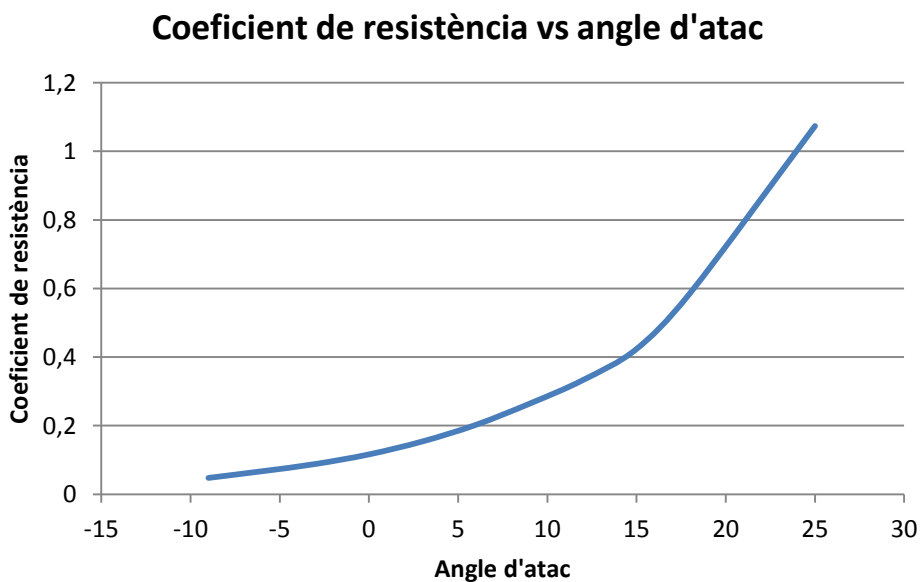


Figura 7.27: Coeficient de resistència vs angle d'atac (°).

A la Figura 7.27 es veu com la relació entre l'angle d'atac i la resistència a l'avanç no és lineal. Conforme s'augmenta la inclinació de l'aleró la resistència augmenta en major magnitud. Es pot veure com al -9° la resistència que presenta el perfil és molt baixa. En canvi, en la configuració no real de 25° la resistència és elevada a causa de les seves males prestacions aerodinàmiques.

Finalment la Figura 7.28 mostra com l'eficiència aerodinàmica disminueix al llarg de les configuracions.

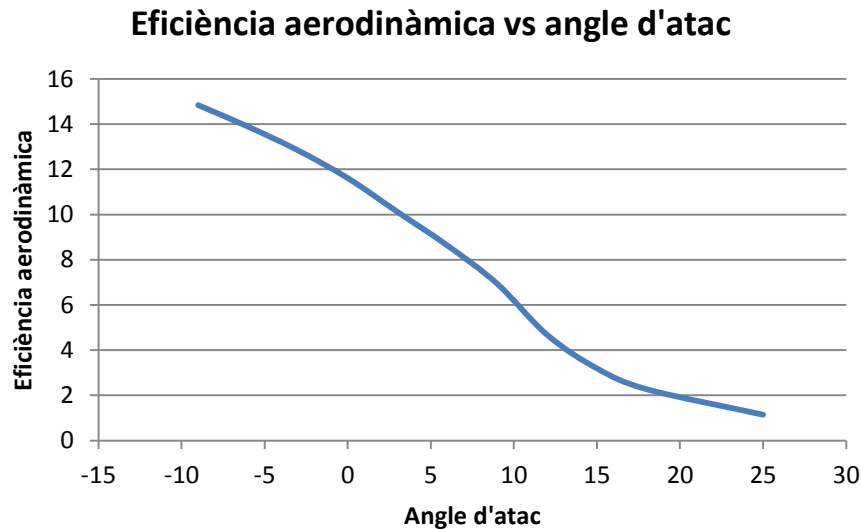


Figura 7.28: Eficiència aerodinàmica vs angle d'atac ($^\circ$).

7.2.1.9 Conclusiones dels resultats

A partir dels resultats obtinguts en les simulacions numèriques i les gràfiques del coeficient de sustentació, resistència a l'avanç i l'eficiència aerodinàmica en vers l'angle d'atac es pot determinar que la configuració més adient per circuits on la càrrega aerodinàmica és més important com el circuit de Mònaco és entre els 6° i 9° .

En canvi, en circuits amb llargues i amples rectes on és més important i més valorat que l'aleró presenti baixa resistència serà més oportú utilitzar configuracions entre els -3° i els 6° . Amb l'aleró entre aquestes inclinacions no deixarà de tenir una considerable càrrega aerodinàmica però presentarà baixes resistències molt favorables a les rectes per assolir les màximes velocitats puntes possibles.

7.2.2 DRS en els circuits

Un cop fetes les simulacions d'un perfil compost i vistes quines són les configuracions més òptimes pels diferents circuits cal comprovar com es comporta l'aleró mòbil en els diferents circuits. Entre tots els circuits del mundial s'han escollit 2; el circuit de Mònaco característic pel seu elevat nombre de corbes a baixes velocitats i el circuit de Monza on la càrrega aerodinàmica requerida és baixa i on són presents importants rectes.

7.2.2.1 DRS en un circuit amb alta càrrega aerodinàmica

Un dels circuits amb més càrrega aerodinàmica és el circuit de Mònaco. El circuit amb un total de 20 corbes per volta és un dels circuits més lents de la Fórmula 1. La importància resideix en tenir la màxima càrrega aerodinàmica per tenir el millor pas per corba. En canvi, com que les rectes són curtes i no s'arriben a altes velocitats no serà tant important tenir una baixa resistència. En la Figura 7.29 es mostra el circuit de Mònaco amb les relacions de marxes i les velocitats al llarg de la volta i en groc la distància on es permet la utilització del DRS.

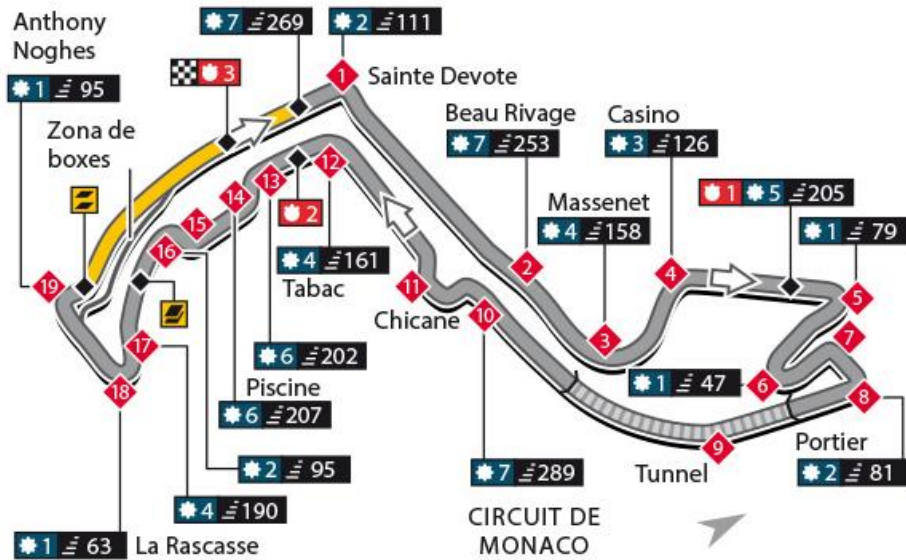


Figura 7.29: Circuit de Mònaco. [34]

En aquest circuit la velocitat màxima en la que arriben els pilots és de 285 km/h sense activar el DRS i 291 km/h amb el DRS activat, per tant, la incorporació del sistema DRS aporta un suplement de 6 km/h de velocitat punta.

Per dissenyar l'aleró oportú per aquest circuit s'ha tingut present quines característiques ha de complir tenint present l'estudi anterior. Primerament ha de ser un perfil gruixut per aportar la màxima càrrega aerodinàmica possible. Seguidament l'angle d'atac ha de ser el més òptim en concordança amb la geometria escollida. Finalment l'aleró dissenyat ha de complir amb les limitacions imposades per la FIA.

Per dissenyar l'aleró s'ha aprofitat l'estudi ja realitzat anteriorment en l'apartat 7.2.1 però el segon flap també és un perfil GOE 525 complint sempre la normativa.

Un cop escollits els perfils d'ala es dissenyen els alerons amb els sistema DRS tancat i obert, on es poden veure les seves dimensions en la Figura 7.30 i 7.31, respectivament

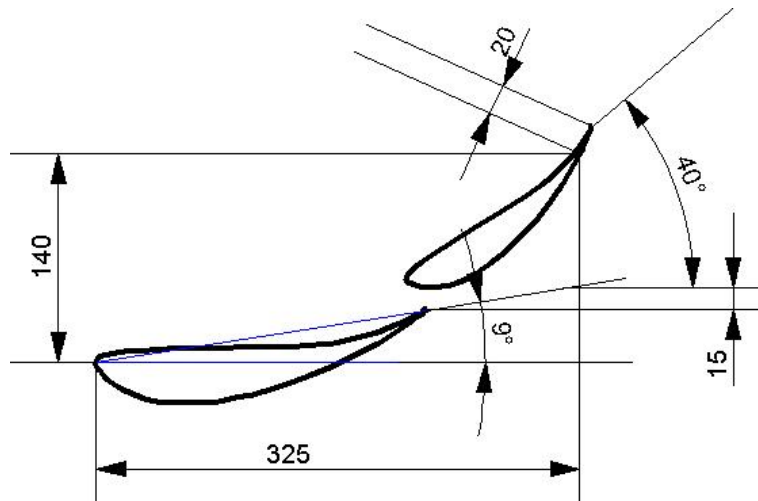


Figura 7.30: Plànol del DRS de Mónaco tancat.

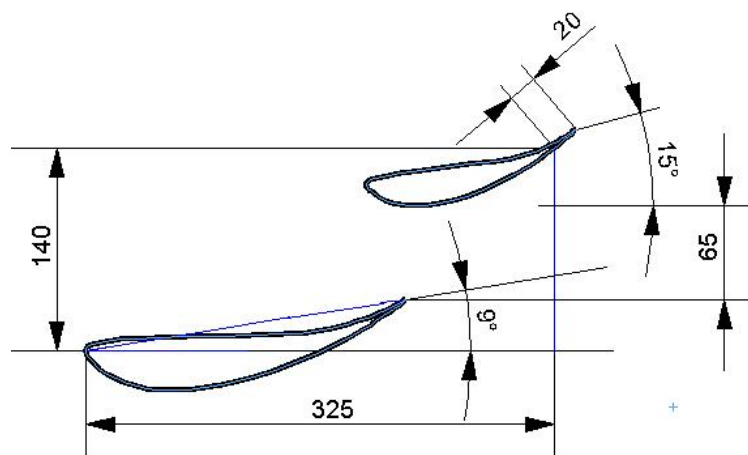


Figura 7.31: Plànol del DRS de Mónaco obert.

Un cop dissenyats els alerons es procedeix a analitzar-los mitjançant les configuracions següents:

- 1) L'aleró amb el sistema DRS tancat a la velocitat màxima del circuit (285 km/h) per obtenir els coeficients de sustentació i resistència a l'avanç i, alhora, les forces de sustentació i resistència.
- 2) L'aleró amb el sistema DRS obert a la velocitat màxima del circuit just quan aquest s'obre, és a dir, a la mateixa velocitat màxima que s'assoleix amb el sistema DRS tancat (285 km/h) amb la finalitat de comparar les forces generades amb el sistema DRS obert i tancat.
- 3) L'aleró amb el sistema DRS obert a la velocitat màxima del circuit estant obert el DRS (291 km/h) per comparar com varien les forces generades variant la velocitat.

7.2.2.1.1 Sistema DRS tancat a 285 km/h

Amb aquesta configuració l'aleró presentarà més resistència en vers les altres atès que el sistema DRS està tancat. Tanmateix tindrà una càrrega aerodinàmica superior.

A la Figura 7.32 es mostra la distribució de pressions amb el sistema DRS tancat.

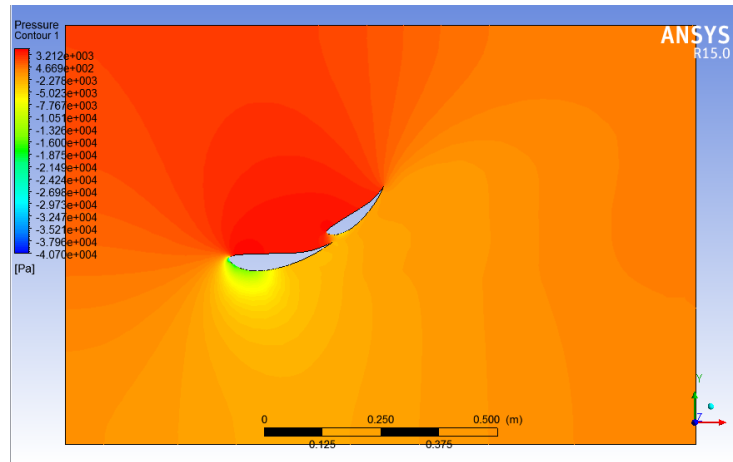


Figura 7.32: Camp de pressions amb el sistema DRS tancat a 285 km/h.

Al haver una pressió en la part inferior menor que en la part superior l'aleró es veurà afectat per una força d'atracció cap a l'asfalt causant una càrrega aerodinàmica superior.

Per veure com afecta la configuració estudiada en la velocitat punta s'analitza el camp de velocitats i l'energia cinètica turbulenta.

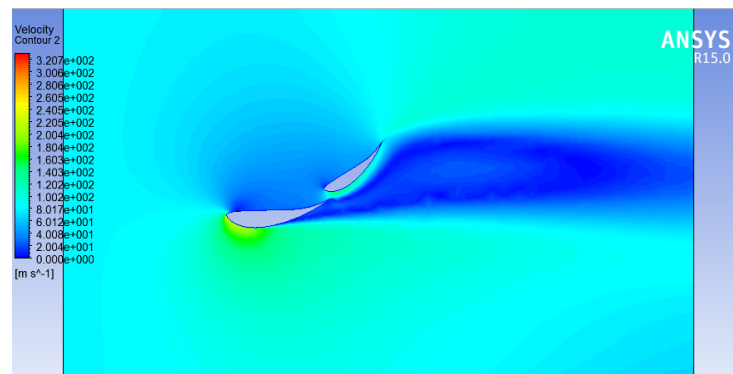


Figura 7.33: Distribucions de velocitats amb el sistema DRS tancat a 285 km/h.

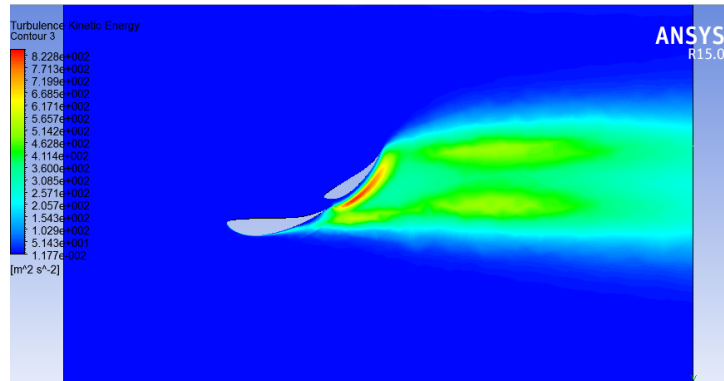


Figura 7.34: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS tancat a 285 km/h.

A partir de la Figura 7.33 i 7.34 es pot veure com l'estela generada darrera l'aleró és important. Això influirà en la velocitat punta del monoplaça degut a les turbulències. Amb aquesta configuració i amb aquest disseny de l'aleró, el monoplaça tindrà una càrrega aerodinàmica elevada, objectiu principal de l'aleró en aquests tipus de circuits.

En la Taula 7.10 es mostren els coeficients de sustentació i resistència en la configuració del sistema DRS tancat a 285 km/h.

DRS			Eficiència
Tancat (285 km/h)	C_D	0,4806	4,85
	C_L	2,3289	

Taula 7.10: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS tancat a 285 km/h.

7.2.2.1.2 Sistema DRS obert a 285 km/h

L'objectiu principal del sistema DRS és disminuir la resistència que presenta l'aleró. A continuació comprovarem si al activar-lo es disminueix aquest factor aerodinàmic.

A la Figura 7.35 es veu la distribució de pressions de l'aleró amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

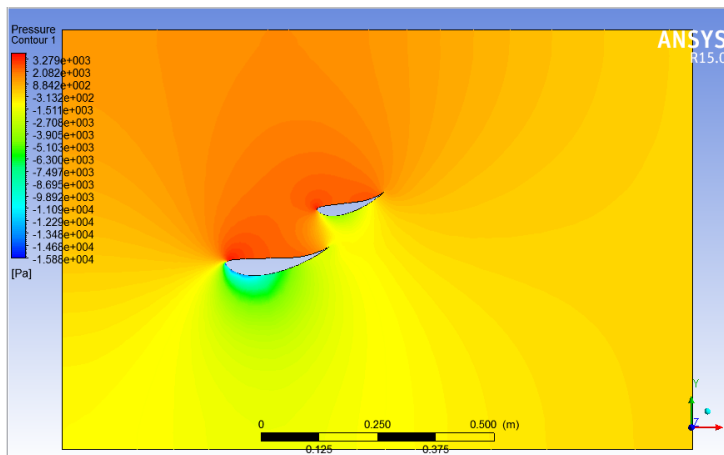


Figura 7.35: Camp de pressions amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

A partir del camp de pressions es pot veure com les pressions amb el sistema DRS obert són menors.

S'ha de veure com és el camp de velocitats i l'energia cinètica turbulenta amb aquesta configuració. L'estela formada darrera l'aleró ha de ser inferior a l'estela formada en el cas anterior. Això significarà que es creen menys turbulències i menys resistència.

A la Figura 7.36 i 7.37 es mostra el camp de velocitats i l'energia cinètica turbulenta.

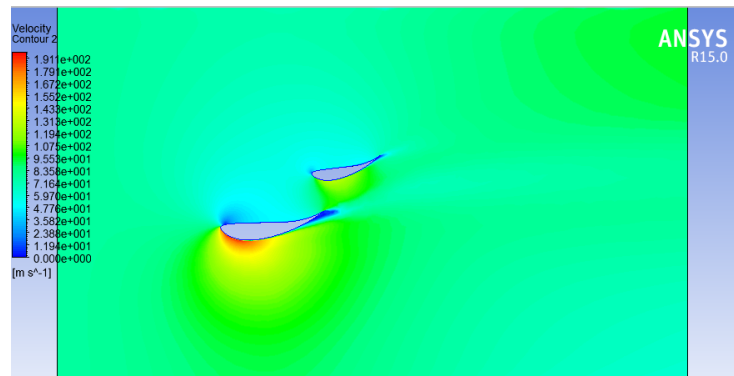


Figura 7.36: Distribucions de velocitats amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

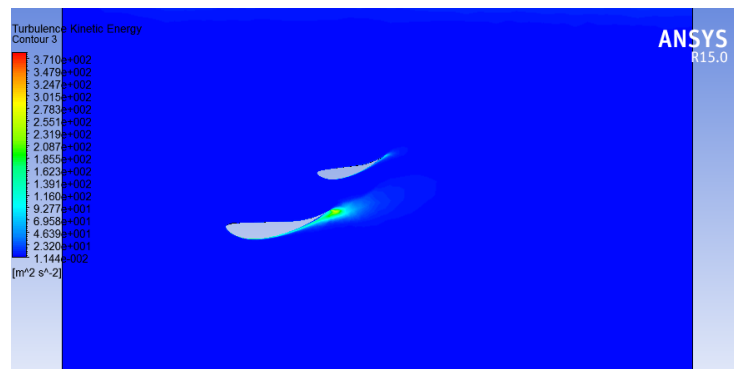


Figura 7.37: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

A diferència que el cas en que el sistema DRS està tancat, aquesta configuració no presenta estela darrera l'aleró, per tant, el coeficient de resistència ha de ser menor.

A la Taula 7.11 es pot veure com els resultats obtinguts són els esperats.

DRS			Eficiència
Obert (285 km/h)	C_D	0,1558	10,76
	C_L	1,6766	

Taula 7.11: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS obert a 285 km/h.

7.2.2.1.3 Sistema DRS obert a 291 km/h

Un cop s'activa el sistema DRS i transcorre cert temps, en el circuit de Mònaco es poden arribar a guanyar uns 6km/h superior de velocitat punta. Aquest tercer estudi es tracta de comparar com afecten aquests 6km/h superiors en les forces generades.

Primer de tot en la Figura 7.38 es mira com és el camp de pressions.

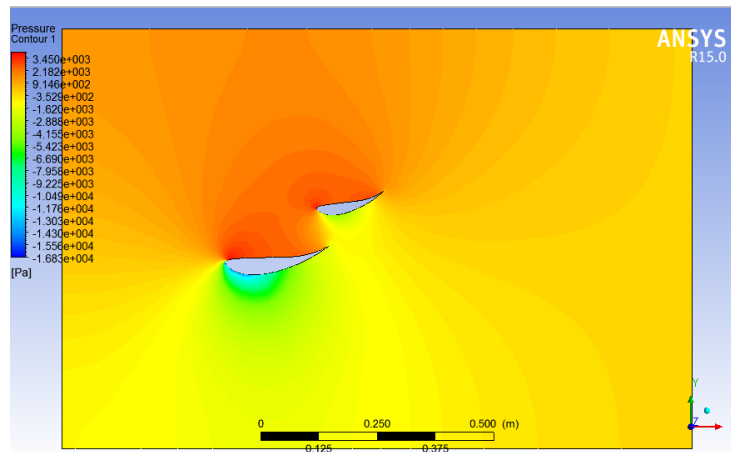


Figura 7.38: Camp de pressions amb el sistema DRS obert a 291 km/h.

Es veu com la distribució de pressions és superior al augmentar la velocitat.

A continuació es compara com afecta al camp de velocitats i a l'energia cinètica turbulenta.

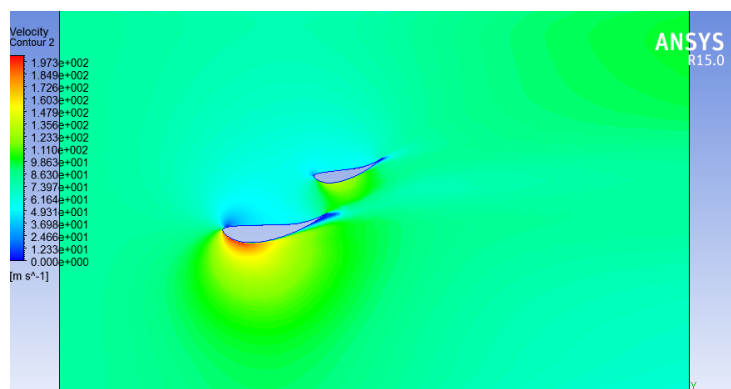


Figura 7.39: Distribucions de velocitats amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

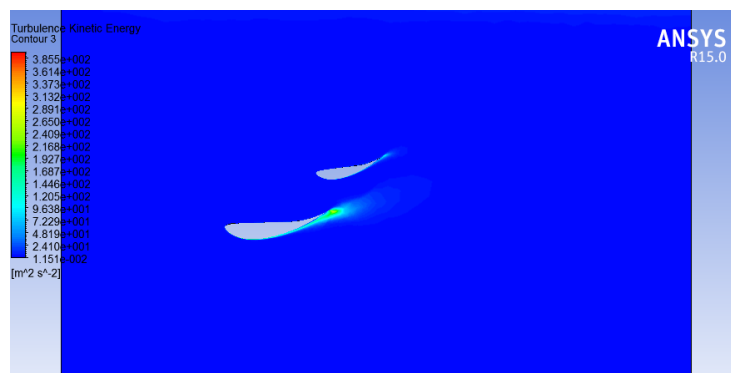


Figura 7.37: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS obert a 285 km/h.

A partir d'aquestes dos representacions es pot veure com l'estela augmenta conforme s'augmenta la velocitat. Si augmenta l'estela també augmentarà la resistència.

A la Taula 7.12 es pot veure com els resultats obtinguts són els esperats.

DRS			Eficiència
Obert (291 km/h)	C_D	0,1582	10,64
	C_L	1,6838	

Taula 7.12: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS obert a 291 km/h.

7.2.2.1.4 Síntesis dels resultats

La Taula 7.13 il·lustra com han anat evolucionat els coeficients al llarg de l'estudi i a conseqüència les forces generades.

Configuració	C_D	C_L	$F_D[N]$	$F_L[N]$	Eficiència
1	0,4806	2,3289	36,7475	177,3229	4,8458
2	0,1558	1,6766	11,9127	128,1959	10,7612
3	0,1582	1,6838	12,6109	134,2244	10,6435

Taula 7.13: Resum dels resultats de les simulacions numèriques.

El primer aspecte a comentar és la diferència en els coeficients al estar activat o desactivat el DRS. Es pot veure com a l'activar-lo el coeficient de resistència a l'avanç es redueix considerablement. És per això que la FIA el va incorporar als monoplaques, per poder obtenir més velocitat punta i facilitar els avançaments. Aquesta reducció es deu a que el fluid passa entre els perfils d'ala sense trobar impediment i, per tant, sense trobar-se resistència.

El coeficient de resistència a l'avanç no és l'únic que disminueix. La càrrega aerodinàmica també ho fa. De la mateixa manera que al no presentar resistència quan el DRS està obert baixa el coeficient de resistència a l'avanç també ho farà el coeficient de sustentació. És per això que el seu ús està limitat a les rectes, perquè pot passar que al arribar a velocitats tant altes i no tenir suficient càrrega aerodinàmica els monoplaques no aconseguixin seguir les corbes i, aleshores, entren en perill els pilots.

El segon aspecte causant d'aquesta minoria en els coeficients no només és degut al canvi de geometria corresponent al flap. També afecta al pla principal, el qual no rep l'acció de la capa límit del flap superior i treballa en millors condicions.

7.2.2.2 DRS en un circuit amb baixa càrrega aerodinàmica

El circuit de Monza és un dels circuits amb menys càrrega aerodinàmica necessària. El circuit amb un total de 12 corbes per volta presenta grans rectes on s'assoleixen elevades velocitats puntes. És per això, que al dissenyar l'aleró més òptim és important que garanteixi una baixa resistència amb l'objectiu de que els monoplaces arribin a velocitats més elevades. En la Figura 7.38 es mostra el circuit de Monza amb les relacions de marxes i les velocitats al llarg de la volta i en groc la distància on es permet la utilització del DRS.



Figura 7.38: Circuit de Monza. [34]

En aquest circuit la velocitat màxima en la que arriben els pilots és de 335 km/h sense activar el DRS i 349 km/h amb el DRS activat, per tant, la incorporació del sistema DRS aporta un suplement de 14 km/h de velocitat punta.

Per dissenyar l'aleró més òptim per aquest circuit també s'ha tingut present quines característiques ha de tenir sense passar per alt el primer estudi. Primerament ha de ser un perfil prim per presentar la mínima resistència a l'avanç possible garantint la suficient càrrega aerodinàmica per seguir les corbes. Seguidament l'angle d'atac ha de ser el més òptim en concordança amb la geometria escollida. Finalment l'aleró dissenyat ha de complir amb les limitacions imposades per la FIA.

Per dissenyar l'aleró s'ha optat per dos perfils d'ala GOE 115, dos perfils d'ala que presenten poca resistència.

Un cop escollits els perfils d'ala es dissenyen els alerons amb els sistema DRS tancat i obert, on es poden veure les seves dimensions en la Figura 7.39 i 7.40, respectivament

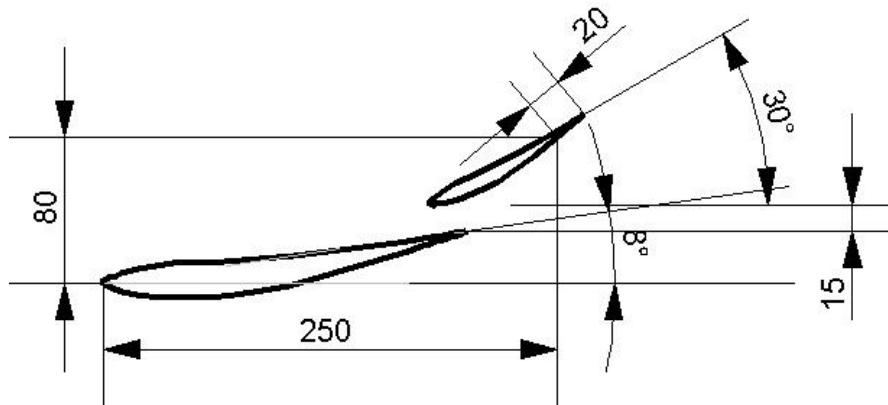


Figura 7.39: Plànol del DRS de Monza tancat.

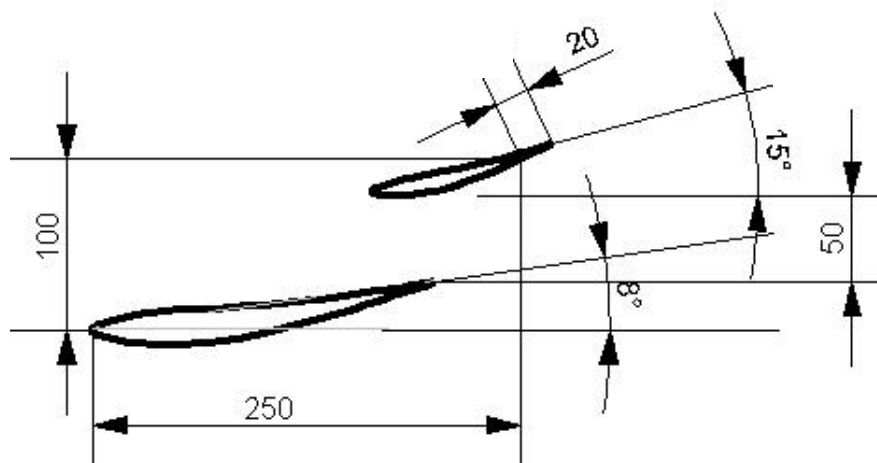


Figura 7.40: Plànol del DRS de Monza obert.

Un cop dissenyats els alerons es procedeix a analitzar-los mitjançant les configuracions següents:

- 1) L'aleró amb el sistema DRS tancat a la velocitat màxima del circuit (335 km/h) per obtenir els coeficients de sustentació i resistència a l'avanç i, alhora, les forces de sustentació i resistència.
- 2) L'aleró amb el sistema DRS obert a la velocitat màxima del circuit just quan aquest s'obre, és a dir, a la mateixa velocitat màxima que s'assoleix amb el sistema DRS tancat (335 km/h) amb la finalitat de comparar les forces generades amb el sistema DRS obert i tancat.
- 3) L'aleró amb el sistema DRS obert a la velocitat màxima del circuit estant obert el DRS (349 km/h) per comparar com varien les forces generades variant la velocitat.

7.2.2.2.1 Sistema DRS tancat a 335 km/h

El disseny de l'aleró en aquest circuit serà dels més importants al llarg del campionat perquè pot facilitar els avançaments i pot determinar el resultat final de la carrera. Tanmateix, el sistema DRS serà molt influent en els monoplaques per arribar a velocitats puntes superiors i poder avançar al pilot precedent. En aquesta configuració, com l'estudi anterior, s'estudiarà com actua l'aleró quan el sistema DRS està tancat. De la mateixa manera serà la configuració amb més forces generades.

En la Figura 7.41 es mostra la distribucions de pressions amb el sistema DRS tancat a 335 km/h.

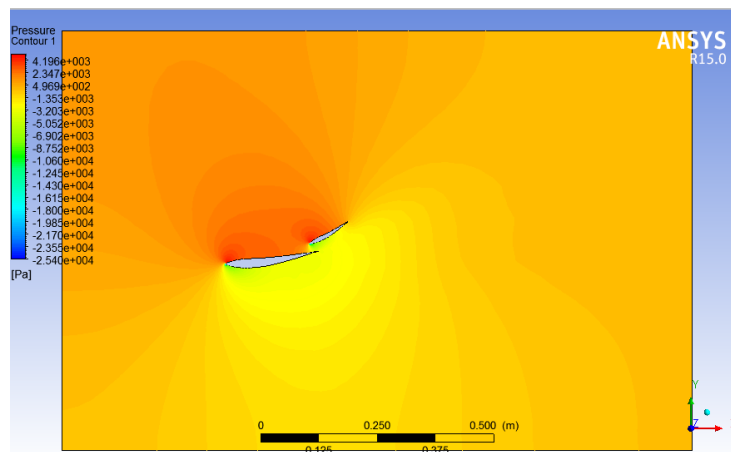


Figura 7.41: Camp de pressions amb el sistema DRS tancat a 335 km/h.

Es pot veure com el camp de pressions és baix degut a la geometria dissenyada ja pensada amb aquest objectiu.

En la Figura 7.42 i 7.43 s'il·lustra el camp de velocitats i el l'energia cinètica turbulenta.

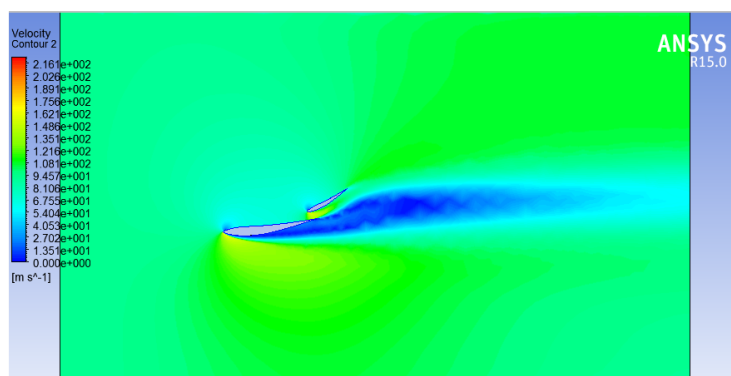


Figura 7.42: Camp de velocitats amb el sistema DRS tancat a 335 km/h.

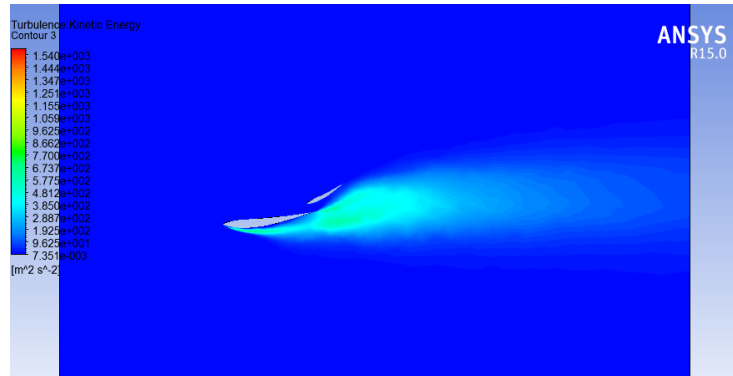


Figura 7.43: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS tancat a 335 km/h.

L'estela generada és destacable i perjudicarà a la velocitat punta del monoplaça. Si es compara amb la Figura 7.32, l'estela d'aquesta configuració és molt menor. Això és degut a que la geometria escollida és més planera i no perjudica tant a la resistència generada per la presència del fluid.

A la Taula 7.14 es pot veure com els resultats obtinguts són els esperats.

DRS			Eficiència
Tancat (335 km/h)	C_D	0,1647	8,0704
	C_L	1,3292	

Taula 7.14: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS tancat a 335 km/h.

7.2.2.2.2 Sistema DRS obert a 335 km/h

A continuació s'obre el sistema DRS i es procedeix a calcular les forces generades. A priori, seran les més petites en tot l'estudi 7.2.2 atès que es treballa amb el disseny més planer. Tot i treballar a més alta velocitat que en el disseny de Mónaco, la geometria utilitzada ha d'originar forces menors.

A la Figura 7.44 es mostra el camp de pressions pel sistema DRS obert a 335 km/h.

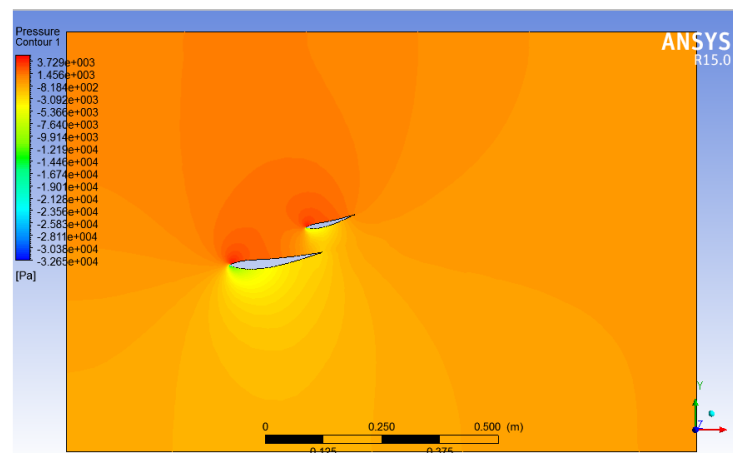


Figura 7.44: Camp de pressions amb el sistema DRS obert a 335 km/h.

Es pot veure com les pressions han disminuït a l'obrir el sistema DRS.

A la Figura 7.45 i 7.46 es mostren el camp de velocitats i l'energia cinètica turbulenta.

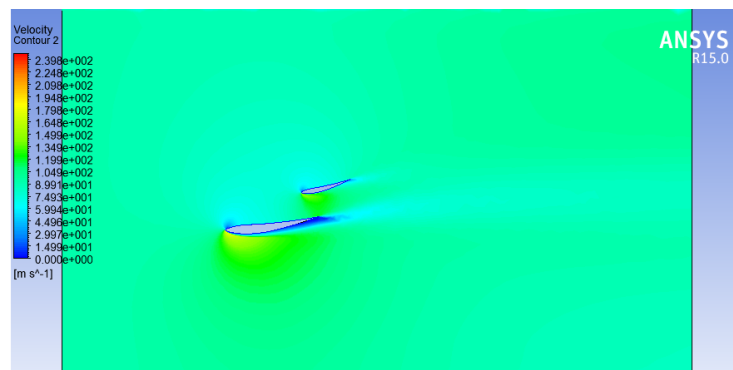


Figura 7.45: Camp de velocitats amb el sistema DRS obert a 335 km/h.

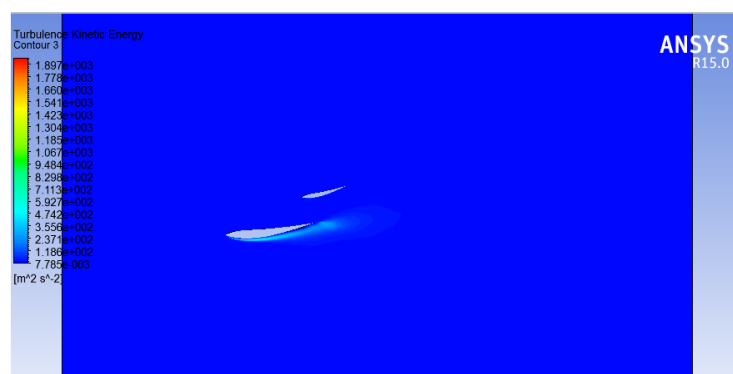


Figura 7.46: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS obert a 335 km/h.

L'estela generada darrera de l'aleró és molt petita, per tant, influirà en menor mesura en la resistència generada.

A la Taula 7.15 es pot veure com els resultats obtinguts són els esperats.

DRS			Eficiència
Obert (335 km/h)	C_D	0,0591	15,4154
	C_L	0,9111	

Taula 7.15: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS obert a 335 km/h.

A partir dels coeficients obtinguts en aquesta simulació es verifiquen els pronòstics. Els coeficients de sustentació i de resistència són els mínims atès que la geometria ho facilita. No obstant, falta confirmar-ho amb la pròxima configuració.

7.2.2.2.3 Sistema DRS obert a 349 km/h

En aquest circuit el sistema DRS és important perquè pot arribar a augmentar fins a 14km/h la velocitat punta del monoplaça. És per això que s'estudia la mateixa geometria anterior però amb el suplement de velocitat punta.

A la Figura 7.47 es mostra la distribució de pressions molt similar a la del cas anterior.

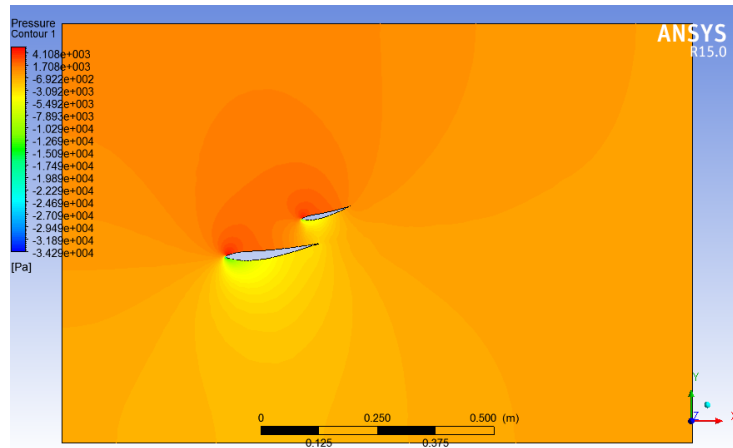


Figura 7.47: Camp de pressions amb el sistema DRS obert a 349 km/h.

Es comprova com el camp de pressions varia mínimament. És important destacar que els punts amb la màxima i mínima pressió seran els mateixos en els dos casos atès que el que s'ha modificat és la velocitat però no la geometria.

A la Figura 7.48 i 7.49 es mostren el camp de velocitats i l'energia cinètica turbulenta.

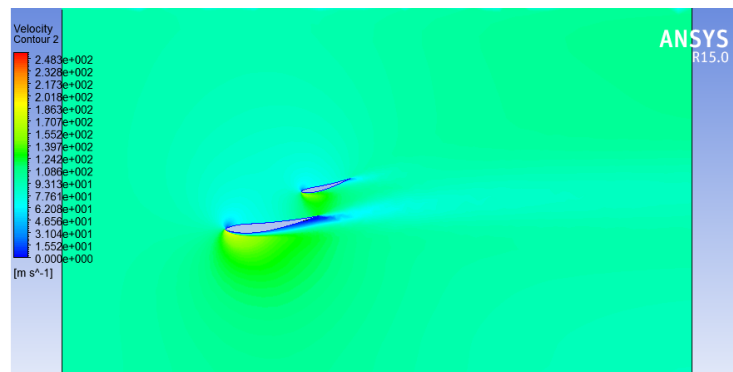


Figura 7.48: Camp de velocitats amb el sistema DRS obert a 349 km/h.



Figura 7.49: Energia cinètica turbulenta amb el sistema DRS obert a 349 km/h.

A partir del camp de velocitats es veu com la màxima velocitat és una mica superior a la del cas anterior confirmant els pronòstics i l'estela també és més gran.

A la Taula 7.16 es pot veure com els resultats obtinguts són els esperats.

DRS			Eficiència
Obert (349 km/h)	C_D	0,0604	15,1010
	C_L	0,9121	

Taula 7.15: Coeficients obtinguts en la simulació del sistema DRS obert a 335 km/h.

7.2.2.1.4 Síntesis dels resultats

La Taula 7.16 il·lustra com han anat evolucionat els coeficients al llarg de l'estudi i a conseqüència les forces generades.

Configuració	C_D	C_L	F_D [N]	F_L [N]	Eficiència
1	0,1647	1,3292	10,4397	84,2531	8,0704
2	0,0591	0,9111	3,7461	57,7513	15,4154
3	0,0604	0,9121	3,8285	57,8147	15,1010

Taula 7.16: Resum dels resultats de les simulacions numèriques.

Com es pot veure en els resultats obtinguts si s'activa el sistema DRS disminueixen les forces que genera l'aleró, per tant, compleix el seu principal objectiu.

Al augmentar la velocitat les forces també augmenten. Això és degut a que el fluid impactarà em més força contra l'aleró i generarà més càrrega aerodinàmica però també més resistència.

L'eficiència varia si el DRS esta activat o desactivat. Com es mostra en la Taula 7.16 l'eficiència quan està activat és major atès que la relació entre les forces de sustentació i les de resistència és major.

7.2.2.3 Comparació dels perfils d'alerons

Si es comparen els dos perfils es poden veure certes diferències que faran que cadascun sigui més oportú segons el circuit. En el circuit de Mònaco, un circuit que requereix molta càrrega aerodinàmica, s'ha dissenyat un aleró amb dos perfils d'ala GOE 525. En canvi, en el ràpid circuit de Monza, un circuit que requereix poca càrrega aerodinàmica, s'han emprat dos perfils d'ala GOE 115. El primer s'ha dissenyat amb l'objectiu d'aportar al monoplaça la màxima sustentació per agafar-se bé a l'asfalt. En el segon, s'ha pensat la seva geometria amb la finalitat de presentar la mínima resistència i poder arribar a altes velocitats atès que els monoplaces amb més velocitat tindran més opcions de creuar la línia de meta primers.

Un cop vist els diferents perfils d'alerons s'estudien les forces implicades. En el DRS compost pels perfils GOE 525 presenta majors forces. Això implica un major coeficient de sustentació que és el que interessa, en contrapartida es tindrà un major coeficient de resistència. Tot i aquest factor contraproductiu, en el circuit de Mònaco es preferible tenir la màxima càrrega aerodinàmica sense tenir tant en compte la resistència atès que no s'arribarà a velocitats tant elevades. En canvi, en el segon circuit és totalment al contrari. El que es prioritza és el fet de tenir el mínim coeficient de resistència ja que en la majoria del circuit es corre a altes velocitats i, per tant, serà un factor molt important. És cert que es busca la mínima resistència a l'avanç però també s'ha de tenir present que la càrrega aerodinàmica també és important per poder passar les corbes a altes velocitats sense anar-se'n fora d'elles.

En els dos casos estudiats quan el sistema DRS està tancat presenta unes forces més elevades. Això és degut a que impedeix el pas del fluid entre el pla principal i el flap generant unes forces majors. A més, amb aquesta configuració es crea una estela darrera de l'aleró creant turbulències i perjudicant l'eficiència.

Quan s'activa el sistema DRS els coeficients de sustentació i resistència a l'avanç disminueixen. Aquest fet es deu a que s'obre el flap superior i permet el pas del fluid entre el flap i el pla principal. El fet de passar entremig fa que no presenti resistència l'aleró amb el fluid i no generi forces. És per això que la FIA el va incorporar. Al reduir la resistència els monoplaces obtenen velocitats puntes més elevades i permet nombrosos avançaments al llarg de la carrera.

La diferència de forces entre els moments en que s'activa el DRS i s'arriba a la màxima velocitat és mínima. L'únic factor que les modifica és el fet d'impactar a més velocitat perquè la geometria és constant.

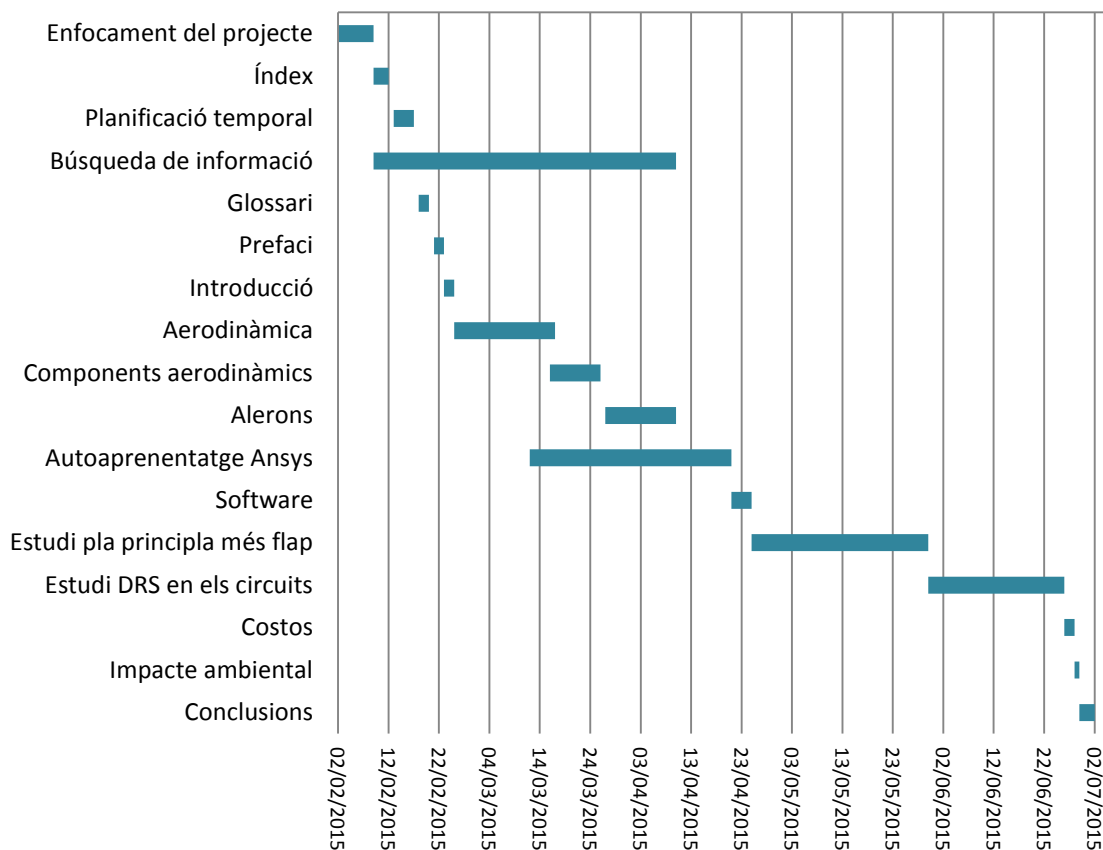
S'ha de tenir present la importància de tancar el sistema DRS quan s'arriba a la corba. Si no es tanca no es té la suficient càrrega aerodinàmica per seguir la corba, fet que pot causar un accident i perillar la seguretat del pilot.

8 Planificació temporal

S'inicia el projecte el dia 02/02/2015, dia en que s'acorda la realització del mateix, i finalitza el dia 01/07/2015 que es la data límit per a entregar-lo.

El projecte s'estructura amb diferents etapes. Primerament s'ha buscat informació per a entendre de la millor manera l'àmbit de la fórmula 1 i la importància de l'aerodinàmica. Paral·lelament es comença a estudiar com funciona el programa *Ansys* per a realitzar les simulacions. A partir d'aquí es fan els dos estudis del projecte; el primer com varia la càrrega aerodinàmica modificant l'angle d'atac i el segon activant el sistema DRS.

A continuació es mostra la planificació que s'ha seguit al llarg del projecte.



9 Costos

A la hora de realitzar el cost econòmic cal considerar totes les despeses al llarg del projecte com el sou del projectista amb qualsevol desplaçament necessari i el cost de la maquinària i software utilitzats.

Es considera que es tracta d'un projecte de consultoria, on una escuderia de la Fórmula 1 s'ha posat en contacta per millorar els alerons dels seus monoplaques, i que es tracta d'un projecte de 12 ECTS, on cada ECT equival a 25 hores de treball. No obstant, el projecte ha ocupat un suplement de 100 hores addicionals amb un preu de 30 € per hora de feina de l'enginyer que realitza el projecte.

Per al desplaçament s'ha comprat, al inici, un bitllet trimestral. Com que el projecte ha durat més d'un trimestre s'han comprat T-10 per viatjar.

Despesa	Cost unitari [Preu/unitat]	Quantitat [unitat]	Cost [€]
Sou	30 €/hora	400 hores	12000€
Trimestral	211 €/bitllet	1 bitllet	211€
T-10	19,60 €/bitllet	3 bitllets	58,8€
Total			12269,8€

Taula 9.1: Costos projectista.

A més a més, cal considerar el cost de dels ordinadors utilitzats i els softwares, en aquest cas l'Ansys i el SolidWorks.

Per a poder construir les geometries, els mallats i les simulacions s'ha necessitat un ordinador potent. Per a fer-ho s'ha comprat un ordinador de 999€ amb la pantalla, teclat i torre.

El programa utilitzat al llarg del projecte és l'Ansys Workbench 15.0 que té un cost de 10000€. A més del cost de comprar-lo s'ha de pagar anualment la llicència que té un cost de 4000€. Un altre programa necessari per a crear les geometries és el SolidWorks que la seva adquisició és de 5000€ i la llicència és de 1000€.

Despesa	Cost [€]
Ordinador	999€
Ansys Workbench 15.0	10000€
Llicència Ansys Workbench 15.0	4000€
Solidworks	5000€
Llicència SolidWorks	1000€
Total	20999€

Taula 9.2: Costos hardware i software.

Amb aquest projecte es pretén guanyar un 15% del cost total, per tant:

Despesa	Cost [€]
Projectista	12269,8€
Hardware i Software	20999€
Subtotal	33268,8€
15%	4990,32€
Total	38259,12€

Taula 9.3: Cost total del projecte.

El cost del projecte oscil·la al voltant dels 40000€. Dintre d'aquesta quantitat entrarien els dissenys dels alerons i les simulacions però no la seva construcció atès que l'abast del projecte no ho comprèn.

A la Figura 9.1 es pot veure com es distribueix el cost total del projecte.

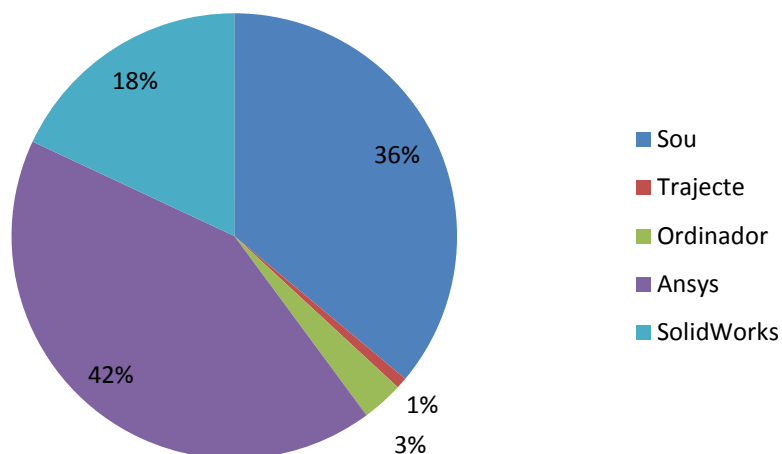


Figura 9.1: Distribució dels 38259,12€ que costa el projecte.

Es pot veure com la despesa principal del projecte, 42%, és l'adquisició de l'*Ansys* i la seva llicència. L'altre gran despesa és el sou de l'enginyer atès que per a fer aquest projecte s'ha hagut de passar moltes hores tant cercant informació com realitzant simulacions. L'adquisició del programa SolidWorks i la seva llicència han costat la meitat que el sou de l'enginyer, és a dir, el 18%. Finalment, l'ordinador i el trajecte amb transport públic han costat el 4% del cost total del projecte.

Si es decidís construir una maqueta per a cada aleró per verificar les simulacions realitzades i veure com es comporta el prototip assajant-la al túnel de vent els costos serien molt majors. S'ha de tenir en compte que no només s'estaria utilitzant el material involucrat per a cada aleró, també el cost del enginyer que realitza els assajos, si no es té un túnel de vent construir-lo, el manteniment de la instal·lació, el consum d'electricitat... Es pot veure com el cost augmentaria considerablement.

És per això que és tant important fer unes bones simulacions, perquè si no es fan correctament i a la hora de assajar al túnel de vent els resultats no són els esperats tota la feina feta no serveix per res i, per tant, s'ha fet una despesa innecessària.

Aquest projecte pot ajudar a millorar els alerons ja utilitzats i permetre obtenir millors resultats. Les escuderies es gasten milions en millores dia rere dia per fer els monoplaques més competitius, és per això que el cost d'aquest projecte tampoc resulta molt elevat, sempre i quan ofereixi millores.

10 Impacte ambiental

El projecte inclou l'estudi dels alerons mitjançant simulacions numèriques amb ordinador, per tant, no s'arriben a construir els prototipus. A part dels beneficis ja comentats al llarg del projecte de treballar amb simulacions en comptes del túnel de vent com la reducció de temps i la reducció de costos, també hi han relacionats amb el impacte ambiental.

Primerament, si es construeixen les maquetes pels túnels de vent s'han de tenir present els materials involucrats. Tanmateix, és important que cada material utilitzat sigui reciclable per a no perjudicar el medi ambient. Un altre inconvenient és que a la hora de realitzar els assajos es consumeix energia de la xarxa i, per tant, es perjudica el medi.

A la hora d'imprimir el treball s'utilitzaran les dos cares del paper i, si és possible, s'utilitzarà paper reciclat. Tanmateix, tot el paper que s'ha utilitzat al llarg del projecte ha estat paper reciclat atès que per anotar dades, observacions i informació és totalment viable i aconsellable.

L'eina principal del projecte ha estat l'ordinador. S'han de tenir en compte els seus components perquè a la hora de que s'espatlli algun i s'hagi de canviar és necessari tenir present que es pugui reciclar. Els ordinadors funcionen amb electricitat i és important a la hora de comprar-los que el seu consum sigui el mínim.

11 Conclusions

A partir dels coneixements sobre mecànica de fluids i de la informació obtinguda sobre la Fórmula 1 al llarg del projecte es poden treure certes conclusions.

Primerament s'ha de tenir present la elevada importància de la aerodinàmica dins de la Fórmula 1. El bon disseny de cada element pot ajudar a reduir mil·lèsimes de segon per volta, fet que pot repercutir en avançar posicions al final de la carrera.

Seguidament, l'aleró posterior del monoplaça té molta influència en les forces originades. La mínima variació de l'aleró pot modificar el comportament del cotxe i presentar més o menys forces segons es cregui oportú.

A continuació, com s'ha vist en el primer estudi, el fet de modificar l'angle d'atac de l'aleró repercutirà en les forces generades i en l'eficiència. Per a angles d'atac baixos les forces de sustentació i de resistència seran menors als dels angles d'atac elevats. Això és degut a que conforme s'augmenta l'angle i es posiciona més verticalment presenta més resistència i, alhora, més càrrega aerodinàmica fins que entre en pèrdua.

A més, segons el circuit serà més oportú una geometria que una altra. Això és degut a que si un circuit consta de nombroses rectes o s'assoleixen altes velocitats serà més indicat utilitzar un aleró menys gruixut i amb menys angle d'atac per presentar la mínima resistència a l'avanç. No obstant, en els circuits d'alta càrrega aerodinàmica serà oportú utilitzar un aleró gruixut amb un elevat angle d'atac perquè encara que presenti una alta resistència a l'avanç també ho farà amb la càrrega aerodinàmica permetent un bon pas per corba.

Finalment la incorporació del sistema DRS en la Fórmula 1 ha estat molt beneficiós atès que permet assolir majors velocitats en les rectes degut a la disminució de les forces presents.

Així doncs, amb aquest projecte s'han pogut extreure conclusions de manera qualitativa i quantitativa del sistema DRS. A partir d'aquest projecte, s'hauria de fer un prototip i assajar-lo als túnels de vent per veure si verdaderament els resultats són els esperats i així ja incorporar-lo a escala real dins els monoplaços de la Fórmula 1.

12 Bibliografia

Les referències bibliogràfiques indicades a continuació han estat esmentades al llarg del projecte, les que no s'hagin indicat s'afegiran a la bibliografia complementària.

- [1] <http://314jyj.foroactivo.com/t41-tecnica-en-formula-1-la-aerodinamica-objetivos>
- [2] <http://www.que-formula1.com/index.php/tag/tunel-de-viento/>
- [3] <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/11028775/Tunel-de-viento-aerodinamica-y-Formula-1.html>
- [4] <http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
- [5] <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/cometas/cometas.htm>
- [6] <http://fisica2pak.blogspot.com.es/p/2-hidrodinamica.html>
- [7] <http://www.reocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/5249/aerodinamica/fuerzaaero.htm>
- [8] <http://www.taringa.net/comunidades/autodeportes/7310646/0495-Los-complejos-fenomenos-aerodinamicos.html>
- [9] http://www.fullaventura.com/municiones/introduccion-amigable-a-la-balistica-de-las-armas-de-fuego_0_840.php
- [10] http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/BUENOS_AIRES/1315/pq2.html
- [11] <http://juandelacuerva.blogspot.com.es/2008/03/capa-lmite.html>
- [12] <http://fansdelaviacion.tvheaven.com/Paginas/pagaerodinamica9.html>
- [13] <http://www.taringa.net/comunidades/formula1/8602892/Conceptos-basicos-de-ingenieria-de-competicion-parte-8.html>
- [14] <http://www.formulaf1.es/2804/aleron-delantero-movil-el-gran-olvidado/>
- [15] <http://www.zigwheels.com/news-features/auto-insight/f1-moveable-wings-and-kers-explained-with-video/7804/>
- [16] <http://www.formulaf1.es/20428/comprendiendo-un-f1-parte-1/>
- [17] <http://clubf1.es/viewtopic.php?f=29&t=27718>
- [18] <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/noticias/2011/10/11/whitmarsh-reconoce-problemas-con-los-retrovisores-hamilton>
- [19] <http://www.formulaf1.es/35416/analisis-tecnico-del-gp-de-china-2013/d13chn1281/>
- [20] <http://www.aadevolantes.com.ar/segdeportiva/segparatodos.asp>

- [21] <http://www.motorsport.com/f1/photo/main-gallery/mclaren-mp4-28-rear-wing-and-rear-suspension/>
- [22] <http://www.f1enestadopuro.com/formula-1-normativa-neumaticos-2015.html>
- [23] <http://www.rcscrapyard.net/es/tamiya-vodafone-mclaren-mercedes-mp4-24.htm>
- [24] <http://www.formulaf1.es/36459/comprendiendo-un-f1-parte-7/>
- [25] http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009_10_01_archive.html
- [26] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe225-il>
- [27] <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2015/01/30/105565-articulo-tecnico-del-sf15-t-ferrari>
- [28] <http://www.racesimleague.com/index.php/es-ES/foro/f1-tecnologica/456-muy-posibles-nuevos-morros-2015>
- [29] <http://www.gpupdate.net/es/noticias-f1/229366/mclaren-invita-a-la-fia-a-inspeccionar-el-aleron-trasero/>
- [30] http://www.formula1-dictionary.net/drs_wing_rear_movable.html
- [31] http://www.levante-emv.com/especiales/formula1-efecto-suelo/2014/04/funciona-drs-n367_12_9800.html
- [32] <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12634136/Formula-1-funcionamiento-del-DRS-y-Kers.html>
- [33] <http://forum.motorionline.com/index.php?showtopic=25080>
- [34] http://as.com/especiales/motor/formula_1/2014/grandes_premios

12.1 Bibliografia complementaria

[12.1] <http://www.google.com>

[12.2] <http://www.wikipedia.com>

[12.3] <http://www.youtube.com>

[12.4] <http://www.f1.com>

[12.5] <http://www.fia.com>

[12.6] <http://www.as.com>

[12.7] <http://www.wordreference.com>

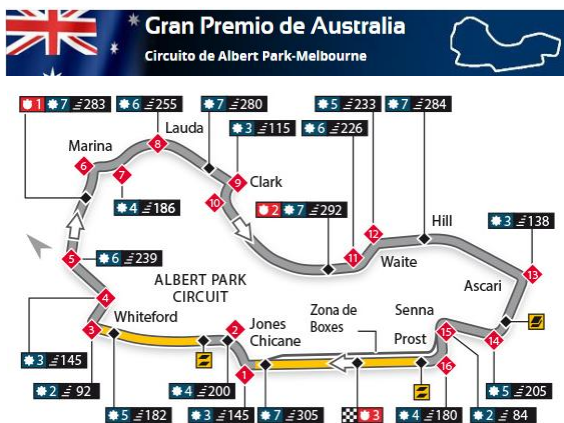
13 Apèndix

A continuació es mostra el calendari del mundial de Fórmula 1 d'aquest any 2015. De cada Gran Premi s'adjunta el circuit amb les relacions de marxes i les velocitats al llarg d'una volta, els punts de detecció del DRS, el punt d'inici on els pilots el poden activar i en groc la distància permesa per a la seva utilització.

A més, s'inclouran les característiques de cada circuit: la longitud total del circuit, les voltes que hauran de fer els pilots per arribar a la línia de meta, la distància total del Gran Premi, el nombre de corbes que hi ha per volta, la velocitat màxima a la que arriben els monoplaça, la càrrega aerodinàmica requerida i, per últim, el desgast dels pneumàtics.

Finalment, s'adjunta una imatge real de cada circuit per veure les seves dimensions a escala real. Juntament hi ha una descripció del circuit.

8.1 Circuit d'Albert Park-Melbourne



Longitud: 5303,00 m

Voltes: 58

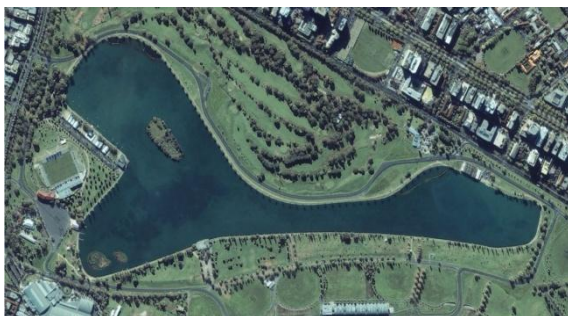
Distància total: 307,574 km

Corbes: 18

Velocitat màxima: 316,00 km/h

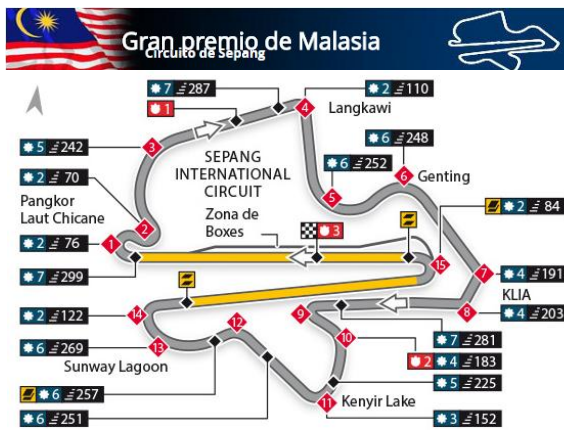
Càrrega aerodinàmica: Mitja/alta

Desgast dels pneumàtics: Mig



El Gran Premi d'Austràlia és un circuit on les corbes es prenen a altes velocitats, per tant, s'ha de dissenyar l'aleró que porti una bona càrrega aerodinàmica per seguir adequadament les corbes. Tanmateix, el circuit té dos activacions del sistema DRS, per tant, el seu disseny serà important.

8.2 Circuit de Sepang



Longitud: 5543,00 m

Voltes: 56

Distància total: 310,408 km

Corbes: 15

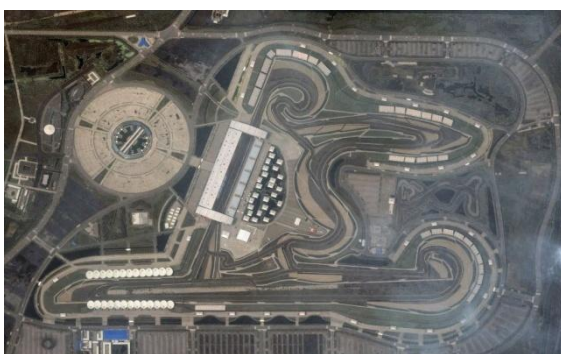
Velocitat màxima: 311,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Malàisia és un dels circuits amb més càrregues laterals. Un traçat molt complet amb corbes ràpides, lentes i amb llargues rectes. Dos de les quals es pot activar el DRS i és en elles on s'arriben a les velocitats més altes del circuit.

8.3 Circuit de Shanghai



Longitud: 5451,00 m

Voltes: 56

Distància total: 305,07 km

Corbes: 16

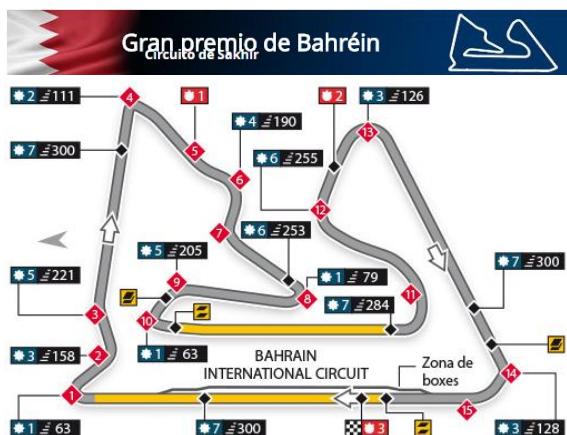
Velocitat màxima: 322,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja/alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Xina té dos llargues rectes, de les més llargues del campionat. Un de les quals té una longitud de 1175 metres. És important dissenyar monoplaques ràpids per poder realitzar els màxims avançaments possibles a les rectes.

8.4 Circuit de Sakhir



Longitud: 5412,00 m

Voltes: 57

Distància total: 308,24 km

Corbes: 15

Velocitat màxima: 313,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Bahréin no implica una dificultat molt elevada, ni tampoc té punts de velocitats molt elevades. La càrrega aerodinàmica necessària és mitja, al igual que el desgast dels pneumàtics.

8.5 Circuit de Catalunya



Longitud: 4655,00 m

Voltes: 66

Distància total: 307,10 km

Corbes: 16

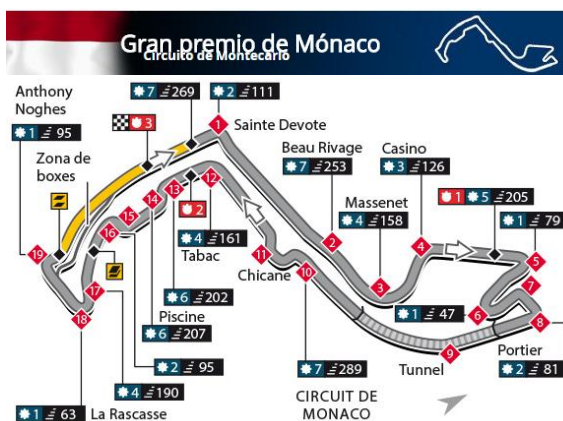
Velocitat màxima: 325,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Catalunya és el primer circuit en terres europees. És un circuit molt tècnic, amb zones de corbes molt ràpides i punts de fortes frenades.

8.6 Circuit de Montecarlo



Longitud: 4655,00 m

Voltes: 66

Distància total: 307,10 km

Corbes: 16

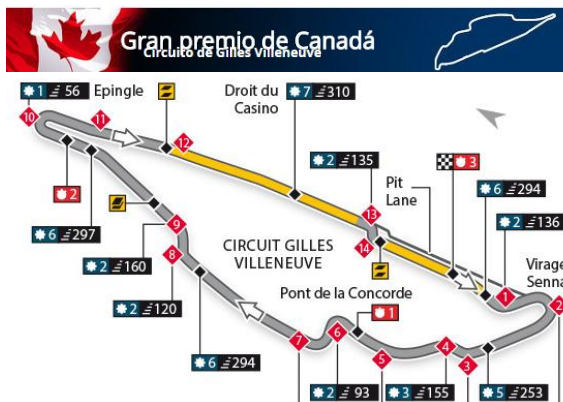
Velocitat màxima: 325,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Mònaco requereix la màxima càrrega aerodinàmica possible. És un circuit molt tècnic on els pilots han d'estar concentrats per conduir amb concentració i precisió. La Pole Position és molt important per obtenir un bon resultat al final de la carrera.

8.7 Circuit de Gilles Villeneuve



Longitud: 4361,00 m

Voltes: 70

Distància total: 305,27 km

Corbes: 14

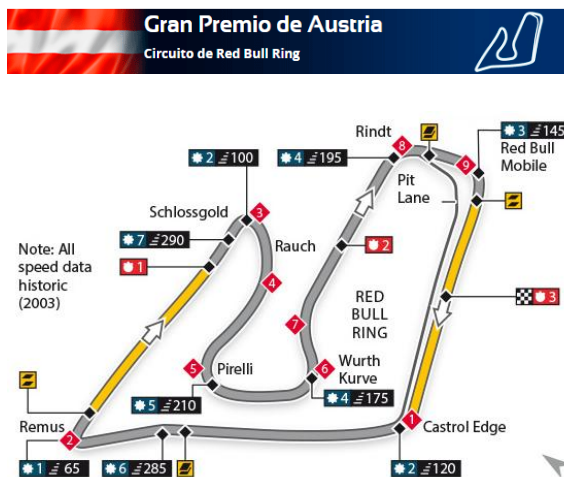
Velocitat màxima: 324,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Baixa

Desgast dels pneumàtics: Mig/baix

El Gran Premi de Canadà es corre en un circuit on es necessita poca càrrega aerodinàmica i on el desgast dels pneumàtics és mig.

8.8 Circuit de Red Bull Ring



Longitud: 4319,00 m

Voltes: 70

Distància total: 302,33 km

Corbes: 9

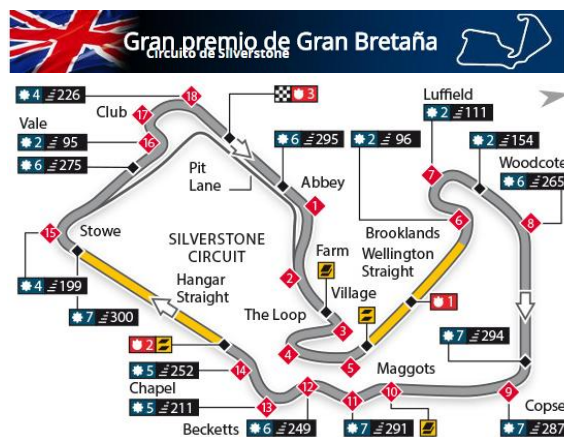
Velocitat màxima: 290,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi d'Àustria amb poc més de 4,3 kilòmetres i només nou corbes és un dels circuits més curts i simple del calendari. No obstant, la seva pista tant estreta sol oferir un bon espectacle als espectadors.

8.9 Circuit de Silverstone



Longitud: 5891,00 m

Voltes: 52

Distància total: 306,23 km

Corbes: 17

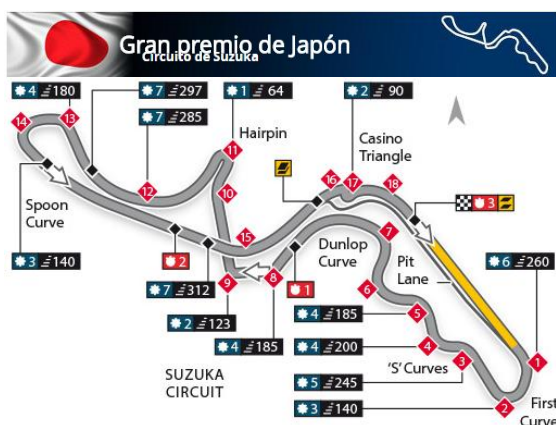
Velocitat màxima: 314,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig/Alta

En la última actualització de la pista del Gran Premi de Gran Bretanya, s'ha convertit en un circuit més llarg on s'ha afegit zones amb de forta frenada per augmentar els avançaments. El seu renovat asfalt és bastant abrasiu amb els pneumàtics.

8.14 Circuit de Suzuka



Longitud: 5807,00 m

Voltes: 53

Distància total: 307,47 km

Corbes: 18

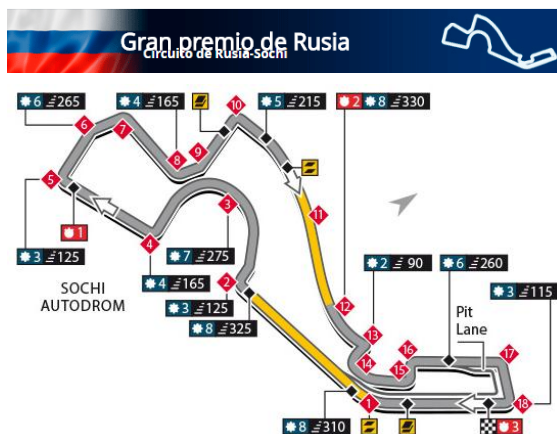
Velocitat màxima: 311,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja/Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Japó és un circuit complicat tècnicament i molt exigent, amb corbes a altes velocitats. La càrrega necessària és alta i el desgast dels pneumàtics és mitjà.

8.15 Circuit de Rússia-Sochi



Longitud: 5853,00 m

Voltes: 52

Distància total: 304,35 km

Corbes: 16

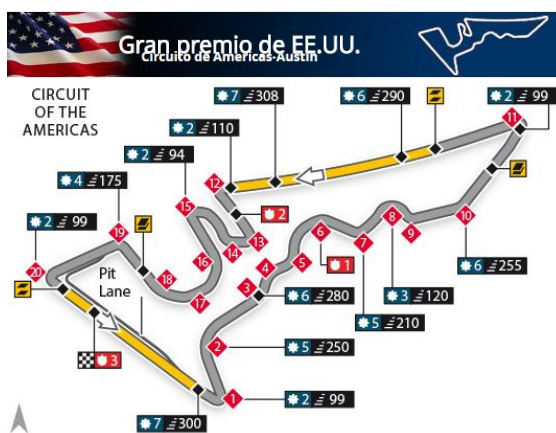
Velocitat màxima: 321,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Rússia va ser creat en la majestuosa vila olímpica on es van celebrar els jocs olímpics de l'any 2014.

8.16 Circuit de Americas-Austin



Longitud: 5516,00 m

Voltes: 56

Distància total: 308,90 km

Corbes: 20

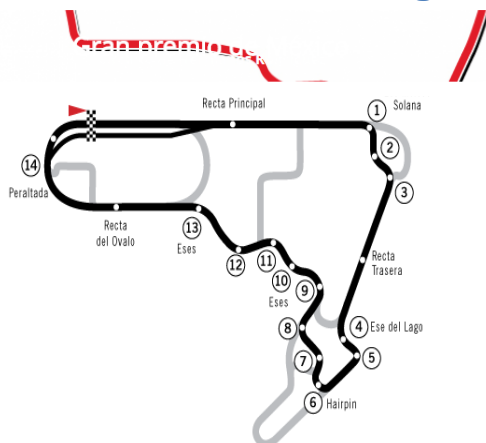
Velocitat màxima: 320,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi d'Amèrica presenta dos llargues rectes per fomentar els adelantaments. Al inici té un sector de corbes enllaçades i al final similar a la Istanbul Park.

8.17 Circuit Hermanos Rodríguez



Longitud: 4052,00 m

Voltes: 74

Distància total: 300,00 km

Corbes: 14

Velocitat màxima: - km/h

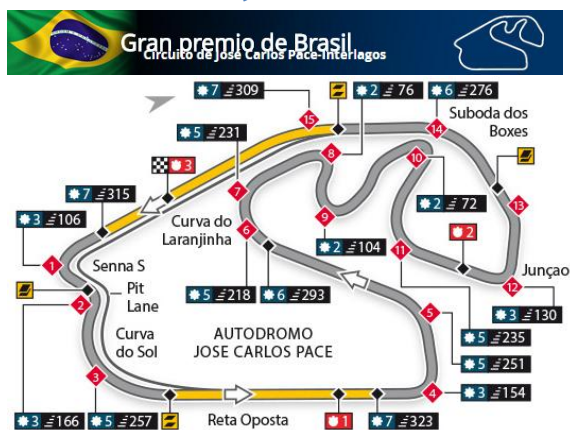
Càrrega aerodinàmica: Mitja

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Mèxic és un circuit nou en el campionat i on es realitzarà una inversió pública i privada de 360 milions de dòlars.

És el primer cop que entra en el campionat des de 1970.

8.18 Circuit de José Carlos Pace-Interlagos



Longitud: 4309,00 m

Voltes: 71

Distància total: 305,91 km

Corbes: 15

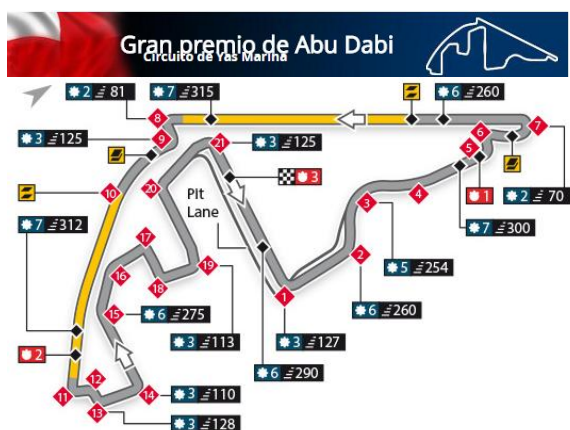
Velocitat màxima: 316,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi de Brasil porta 2 anys sense tancat el campionat. No obstant, és una de la carreres més vistes de la temporada atès que els pilots que poden optar el títol es juguen el campionat.

8.19 Circuit de Yas Marina



Longitud: 5554,00 m

Voltes: 55

Distància total: 305,36 km

Corbes: 20

Velocitat màxima: 323,00 km/h

Càrrega aerodinàmica: Mitja/Alta

Desgast dels pneumàtics: Mig

El Gran Premi d'Abu Dhabi és el circuit més luxós del campionat. Tot i això, és un circuit on és difícil avançar, per tant, el nombre d'avançaments és baix.

Al ser la última carrera del mundial, els punts valen doble.

